

分类号: TP23

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220340128



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于双振镜系统的高速运动目标
位姿测量方法研究

论 文 作 者 刘俊楠

指 导 教 师 王力超

学 科 (专 业) 控制科学与工程

研 究 方 向 人工智能

论文提交日期: 2025 年 5 月 6 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：刘俊楠

日期：2025年 5 月 16 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程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、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒

学位论文作者签名：刘俊楠

指导教师签名：马力超

日期：2025年 5 月 16 日

日期：2025年 5 月 16 日

基于双振镜系统的高速运动目标位姿测量方法研究

摘 要

随着机器视觉测量技术在体育、军事、机器人、航天等诸多领域广泛应用,通过分析图像信息对高速运动目标的位姿测量也成为了热点问题。然而,针对高速目标的快速运动,无法通过常规的拍摄方法得到较为清晰、可处理的目标图像。针对高速运动目标正常拍摄无法得到清晰图像这一个问题,本文设计了一种仰角相机加双振镜的测量系统。相对于改变高速相机的位置,振镜具有更小的体积、更轻的质量,通过电控调节振镜的旋转来控制高速相机的视觉,从而获得更加清晰的高速目标运动图像。特殊的仰角结构可以避免相机本体与振镜之间的遮挡,从而获得更大的测量视野。由于传统双目测量存在同步问题,难以对高速运动目标进行实时成像,单相机成像模式不需要考虑这一问题,同时也简化了系统结构,降低了系统成本。

本文的主要研究内容和贡献如下:

(1) 设计了一种基于单个仰角相机和双振镜的测量结构,扩展了传统相机加振镜的测量范围,实现了单相机形成立体视觉的测量效果,最终实现对高速目标进行大范围的三维姿态测量。设计内容包括测量系统的结构设计、双振镜运动模型的推导以及光路的结构布置等。实验结果表明,该测量系统可以在较大范围内实现对目标的跟踪拍摄,测量范围为单相机拍摄的 2.27 倍,图像清晰度满足测量需求。

(2) 为实现大范围的三维测量,双振镜会随目标的移动而旋转,

虚拟相机的外参也会随之发生改变。为了获得振镜旋转后虚拟相机的外参,本文采用基于虚拟双目标定(virtual binocular calibration, VBC)外参估计的方法获得虚拟相机之间的位置关系,该方法利用的振镜旋转角度与虚拟相机位姿变换一一对应的关系,在获得单个振镜下虚拟相机的外参条件下,计算双振镜在旋转前后虚拟相机的外部参数。实验结果表明,振镜 a、b 每次旋转 0.25° , 虚拟相机 a 绕 Y 轴旋转的平均值为 0.480° , 绕 Z 轴旋转的平均值为 -0.181° , 虚拟相机 b 绕 Y 轴旋转的平均值为 0.468° , 绕 Z 轴旋转的平均值为 -0.168° 。

(3) 针对传统中轴线测量存在视角差的问题,采用初始位姿和相对位姿分开测量的模式。由于采用了单相机加双振镜的测量模式,该系统遵循双目视觉的测量原理。初始位姿测量基于 Hough 直线检测、Sift 特征点匹配、加权重心法。相对位姿测量采用多图像特征点匹配加点云配准,在确保测量精度的同时降低了测量的速度和要求。在静态目标误差验证实验中,其位置的平均相对误差为 1.96%,姿态的平均相对误差为 3.29%。在动态目标模拟实验中,其位置的平均相对误差为 2.89%,姿态的平均相对误差为 3.99%。最后在高速运动目标的实验中,对高速运动目标进行姿态测量,验证了算法的有效性。

关键词: 高速运动目标, 单相机, 双振镜, 位姿测量, 特征点匹配

HIGH-SPEED MOTION TARGET POSITION MEASUREMENT BASED ON DUAL GALVANOMETER SYSTEM MEASUREMENT METHODS

ABSTRACT

As machine vision measurement technology is widely used in many fields such as sports, military, robotics, aerospace, etc., the position measurement of high-speed moving targets by analyzing image information has also become a hot issue. However, for the rapid movement of high-speed targets, it is not possible to obtain clearer and processable target images by conventional shooting methods. In order to address the problem of high-speed targets can not get a clear image of normal shooting, this paper designs an elevation camera plus dual galvanometer measurement system. Compared with changing the position of the high-speed camera, the galvanometer has a smaller volume and lighter mass, and the rotation of the galvanometer is electronically adjusted to control the vision of the high-speed camera, so as to obtain clearer high-speed target motion images. The special elevation structure can avoid the obstruction between the camera body and the galvanometer, so as to obtain a larger measurement field of view. Due to the synchronization problem of traditional binocular measurement, it is difficult to image high-speed moving targets in real time. The single camera imaging mode does not need to consider this problem, and it also simplifies the system structure and reduces the system cost.

The main research and contributions of this paper are as follows:

(1) A measurement structure based on a single elevation camera and dual galvanometer is designed to extend the measurement range of the traditional camera plus galvanometer, to realize the measurement effect of single camera forming stereo vision, and finally to realize the large-range three-dimensional attitude measurement of high-speed targets. The design includes the structural design of the measurement system, the derivation of the dual galvanometer motion model and the structural arrangement of the optical path. The experimental results show that the measurement system can realize the tracking and shooting of the target in a large range, and the measurement range is 2.27 times of that of the single-camera shooting, and the image clarity meets the measurement requirements.

(2) In order to realize wide-range 3D measurements, the dual galvanometer will rotate with the movement of the target, and the external parameter of the virtual camera will be changed accordingly. In order to obtain the external parameters of the virtual camera after the rotation of the galvanometer, this paper adopts the method based on virtual binocular calibration (VBC) external parameter estimation to obtain the positional relationship between the virtual cameras, which utilizes the one-to-one correspondence between the rotation angle of the galvanometer and the virtual camera's attitude transformation, and under the condition of obtaining the external parameter of the virtual camera under the single galvanometer, the external parameters of the virtual camera are calculated. This method utilizes the one-to-one correspondence between the rotation angle of the galvanometer and the positional transformation of the virtual camera under the condition of obtaining the external parameters of the virtual camera under a single galvanometer. The experimental results show that for each rotation of 0.25° of galvanometers a and b, the average value of virtual camera a rotated around the Y-axis is 0.480° , and the average

value of virtual camera b rotated around the Y-axis is -0.181° , and the average value of virtual camera b rotated around the Y-axis is 0.468° , and the average value of virtual camera b rotated around the Z-axis is -0.168° .

(3) To address the problem of poor viewing angle in traditional centerline measurement, the mode of separate measurement of initial and relative positions is adopted. Due to the measurement mode of single camera plus dual galvanometer, the system follows the measurement principle of binocular vision. The initial position measurement is based on Hough straight line detection, Sift feature point matching, and weighted center of gravity method. The relative position measurement uses multi-image feature point matching plus point cloud alignment, which ensures the measurement accuracy while reducing the measurement speed and requirements. In the static target error verification experiment, the average relative error of its position is 1.96% and the average relative error of its attitude is 3.29%. In the dynamic target simulation experiment, the average relative error of its position is 2.89% and the average relative error of its attitude is 3.99%. Finally, in the experiment of high-speed moving target, the attitude measurement of high-speed moving target verifies the effectiveness of the algorithm.

Junnan Liu (Control science and engineering)

Supervised by Lichao Wang

KEY WORDS: high-speed moving target, single camera, dual galvanometer, posture measurement, feature point matching

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 高速目标测量的研究现状.....	2
1.2.2 基于振镜系统测量的研究现状.....	4
1.2.3 三维位姿测量的研究现状.....	8
1.3 本文的主要研究内容及章节安排.....	10
1.3.1 主要内容.....	10
1.3.2 章节安排.....	11
第 2 章 双振镜测量系统设计.....	13
2.1 本章引言.....	13
2.2 测量系统工作原理.....	13
2.3 系统结构设计.....	15
2.4 系统结构参数推导.....	18
2.4.1 相机仰角及振镜高度推导.....	18
2.4.2 双振镜的摆放位置推导.....	20
2.5 测量范围对比.....	21
2.6 本章小结.....	24
第 3 章 振镜旋转关系建模.....	25
3.1 本章引言.....	25
3.2 振镜随运动目标旋转模型.....	25
3.2.1 单振镜旋转模型分析.....	25
3.2.2 双振镜旋转模型分析.....	29
3.3 单个虚拟相机的外参估计.....	32
3.3.1 基于几何的外参估计.....	32

3.3.2 基于 VBC 的外参估计	33
3.4 振镜旋转后虚拟相机的外参估计.....	34
3.5 实验验证.....	36
3.6 本章小结.....	39
第 4 章 高速运动目标的位姿测量方法.....	40
4.1 本章引言.....	40
4.2 测量原理.....	40
4.2.1 图像预处理.....	41
4.2.2 Sift 特征点匹配.....	42
4.2.3 显著性目标检测.....	43
4.3 初始位姿测量.....	46
4.3.1 初始位置测量.....	46
4.3.2 初始姿态测量.....	47
4.4 运动目标位姿测量.....	48
4.4.1 相对位姿测量.....	49
4.4.2 坐标系迭代.....	49
4.5 本章小结.....	50
第 5 章 实验及结果分析.....	51
5.1 本章引言.....	51
5.2 实验平台搭建.....	51
5.3 测量方法精度验证实验.....	54
5.3.1 相对位置测量精度验证.....	54
5.3.2 相对姿态测量精度验证.....	56
5.4 高速运动目标测量实验.....	57
5.4.1 标定和初始位姿测量.....	57
5.4.2 运动目标模拟测量实验.....	59
5.4.3 高速运动目标位姿测量实验.....	61
5.5 对比试验.....	65

5.6 本章小结.....	66
第 6 章 总结和展望.....	67
6.1 总结.....	67
6.2 展望.....	68
参考文献.....	70
攻读学位期间发表的学术成果.....	76
致谢.....	77

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

随着时代和科技的发展,高速目标的位姿测量技术开始广泛应用于自动化生产设备^[1-2]、智能系统^[3-4]、国防军事^[5-6]、生物医学^[7-8]及体育项目^[9]等各个方面。在高速目标的运动过程中,其位姿参数常用来描述高速目标的空间状态,还常用于各个领域运动目标的性能测试与分析,以便于开发人员进行故障检测,同时对运动目标的轨迹优化也有着重大意义。但由于高速目标运动速度快且实验环境复杂,三维位姿测量的难度较大。

在姿态测量中,由于光学测量可以在与测量目标不接触的情况下,可以精准地测量运动目标的运动参数,故受到广大学者的关注与研究。其次,光学测量从测量方法上可分为主动式三维测量和被动式三维测量,主动式三维测量通常需要依赖外部条件,如结构光^[10]、激光^[11]等,对测量环境有着一定的要求。被动式三维测量不需要特殊的光学设备,仅仅依靠相机拍摄的目标图像即可完成测量,因此被动式三维测量具有更广泛的应用需求。被动式三维测量从所用相机的数量可分为单目测量^[12]、双目测量^[13]和多目测量^[14]。单目测量主要是通过单张图片,获取空间目标的三维位姿以及姿态角信息。相对于单目测量,双目测量和多目测量获取目标的空间信息更加全面,可以更真实的反映出客观物体的空间信息。单目测量对空间中的物体投影模型类似于一条射线,缺少一个维度,无法获得目标的深度信息。双目测量对空间中的物体投影模型类似于人的双眼,两个直线确定一点,其测量范围相机视野的重叠处。然而,由于高速相机重量较大,移动不便。此外,双目相机需要同时获取同一目标的两幅图像,因此对高速目标的同步拍摄提出了较高要求。多目测量的原理与双目测量类似。

本课题基于以上背景,为解决单目测量系统维度缺失以及双目和多目测量系统视野固定的问题,提出了一种基于双振镜的单目相机高速目标位姿测量方法。由于振镜具有的轻量化、价格低廉、安装方便等优点,其在视觉测量领域得到了广泛应用^[15]。此外,双振镜可以在单目相机中形成两条不同的光路,从而解决单

目测量维度缺失的问题。双振镜的旋转跟踪给高速目标的测量提供了可能性，同时弥补了振镜加相机测量系统分辨率降低的问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 高速目标测量的研究现状

随着测量技术的持续进步，测量设备不断更新，对高速运动目标的测量方法也在不断创新，其测量方法主要可分为接触式测量和非接触测量两类。在接触式测量方法中，传感器被安装在被测目标上，通过分析和计算传感器数据来获取目标的运动学参数。非接触式测量通过相机等外部设备获取测量目标在空间中的位置，通过分析测量目标在空间中的位置信息来确定其测量参数。

接触式测量由于其测量简单、精度较高等优点，各类的测量方法也因运而生。如在测量内弹道高速弹丸的速度方面，王德田等人采用了任意反射面激光干涉和全光纤干涉仪的技术^[16]。冯志勇等人则通过陀螺仪和加速度计信号的融合方法，提升了旋翼飞行器位姿与速度的测量稳定性^[17]。马秀丽将磁阻和陀螺的方式相结合用于测量目标运动位姿，并提出了一种 UKF 的姿态角解算方法，以便快速通过回传信号变化计算高精度姿态角^[18]。傅忠云等人对传感器 MPU6050 的滤波算法进行了改进，使其适用于多种运动位姿的测量系统^[19]。牛春峰通过陀螺仪和 GPS 的组合，测量高速运动目标的姿态角^[20]。邵艳巡等人采用惯性与磁力传感器融合的方法来测量目标位姿^[21]。这些方法利用传感器实现目标运动学参数的直接测量，但其准确性受到传感器本身精度的影响，这对传感器的性能有一定的要求。

由于接触式测量方法测量设备会影响测量目标自身精度这一问题，非接触测量通过外部条件对目标测量可以很好的规避这一问题，逐渐受到科研人员所追捧。对于高速运动目标非接触式测量可分为光学测量和非光学测量。光学测量主要是通过相机拍摄运动目标的图像，通过对图像的信息处理，得到其运动目标的运动学参数，因此如何得到清晰的图像在光学测量中十分重要^[22]。Yin 等人研发了一种高速 3D 形状测量技术，该技术结合了优化的复合条纹图案与立体辅助结构光系统，并开发了一种优化策略，用以设计复合图案，有效解决了条纹周期过小所带

来的挑战,使得该技术能够精准捕捉运动目标的形态变化^[23]。Liang 等人介绍了一种单发超快光学成像,该方法可以在光谱范围内捕获二维瞬态场景 ≥ 100 百万帧/秒,对高速目标的清晰成像起到重要作用^[24]。Zuo 等人提出了一种针对动态场景的高速三维形状测量方法,该方法基于双频三极脉宽调制 (TPWM) 条纹投影技术,首先通过双频相移算法同步获取两个不同频率的包裹相位图,随后采用基于查找表的数字理论方法对这两个相位图进行解包裹处理,从而实现高精度的三维形状重建^[25]。吴周杰等人就条纹投影的高速三维形貌测量技术的发展进行分析,比较已有技术各自的优缺点,给出不同测量任务下的方法选择建议^[26]。周全等人分析了夹缝摄像机的发展状况,该方法常用于武器靶场种飞行目标的各项参数进行记录和测量^[27]。李冬冬设计了一种基于线阵相机的靶场测量系统,该系统以线阵相机作为成像传感器,结合双像器获取弹丸目标在两个正交视角下的立体扫描图像,最后通过对这些图像的分析,该系统能够精确测量弹丸目标的速度、攻角等关键运动参数^[28]。何鑫等人研究了一种电子内窥成像系统,该系统采用了直径仅为 1 毫米的 NanEyeM 超微型串行图像传感器,并结合可编程门阵列 FPGA 技术。通过实验验证,该内窥系统能够以 35 帧每秒的高帧频输出图像数据,并流畅、稳定地实现 320×320 分辨率的彩色图像显示^[29]。乔志旺采用一种阴影照相技术,其测量方案如图 1-1,该系统可以对外场高速飞行目标的运动学参数进行测量,并改进了外场测量校准系统,从而提升了系统的测量精度^[30]。

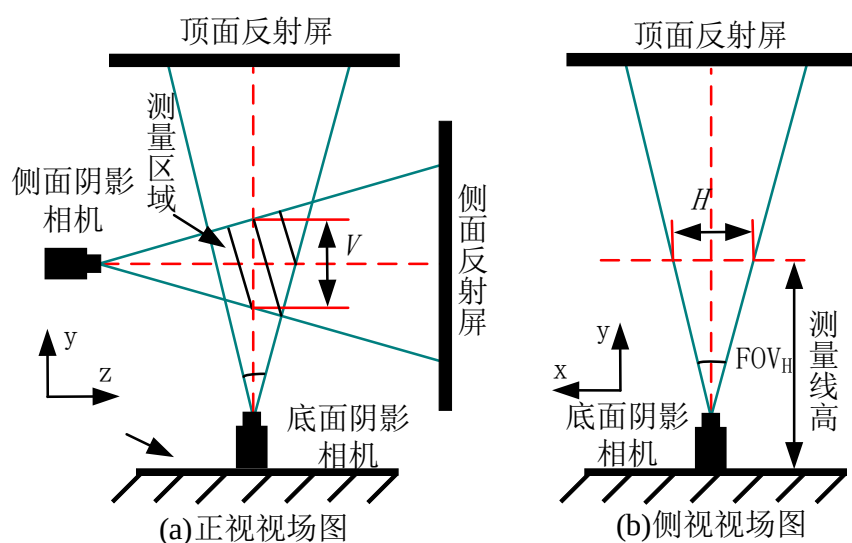


图 1-1 阴影照相站光轴竖直正交的测量方案

非光学的测量是指利用非光学技术对高速运动目标进行非接触式测量的方法,如雷达、超声波、电磁场、声学等。非光学测量通常用于复杂环境,如光学无法或很难成像的情况下。何林泽等人对高速弹丸轨迹的测量精度进行了深入研究,重点分析了雷达测元误差以及弹丸相对于雷达的运动状态对轨迹测量精度的影响,并提出了合理选择最优初值点的方法^[31]。Yan 等人提出了一种基于多个雷达在高度杂乱区域环境中提供的测量结果检测和跟踪多个目标的算法,通过三个阶段将同一目标的小轨迹关联起来,从而实现对复杂区域内多个目标的精准检测与跟踪^[32]。朱阁彦设计了一种三维半球形超声波传感器阵列结构,该结构可以对风速风向进行测量^[33]。Gao 等人开发了一种改进的脉冲测距算法,这种新算法结合了匹配滤波器算法和常分数判别(CFD)算法,该硬件系统实现了高速处理和高速采样数据传输,提高了测量的速度^[34]。王俊提出了一种激光测距方法,通过发射频率为 20MHz、重复频率为 1MHz 的周期性正弦信号,并结合全相位 FFT(快速傅里叶变换)技术,实现了厘米级别的高精度测距^[35]。

1.2.2 基于振镜系统测量的研究现状

随着光学振镜的发展,由于其价格便宜,重量轻、体积小等优点,基于振镜的计算机视觉逐渐引起学者的注意。人们可以通过旋转的光学振镜改变光路结构,从而实现大范围的目标跟踪和三维测量。

由于将光学振镜置于振镜的前侧,可以通过改变振镜的旋转角度达到改变相机视角的作用,相对于常规的改变相机的方位更加简单和安全,相机加振镜的方式在跟踪方向十分流行。英国 MS 公司开发的 Flight Follow 产品基于上述原理设计^[36]。当目标经过触发位置时,振镜以恒定速度旋转,将目标图像反射至高速摄像机。东京大学石川实验室研制了一种二维目标跟踪系统^[37],该系统将高速摄像机固定在适配器上,并在其前方安装双轴扫描振镜。通过调整这两个振镜的旋转角度,可以捕捉到空间中快速移动的目标。此外,在高速相机与振镜之间设置了一个光心前移系统,该系统由三个凸透镜组成,通过特殊配置使光心点更靠近扫描振镜,进而扩大视场范围。张正涛等人开发了一种基于高速相机的目标追踪系统^[38]。该系统利用两台高速相机获取目标在两个画面中的二维坐标,并结合事先标定的相机参数,计算出目标的三维坐标,从而实现目标跟踪。王义琼等人针对

现有弹道跟踪系统中反射镜偏转速度仅由弹丸出膛速度决定、无法根据目标实际位置实时调整的问题，提出了一种新型弹道跟踪系统，该系统能够基于目标实时位置动态修正反射镜的偏转速度，从而提升跟踪精度^[39]。李子阳等人采用二维凝视跟踪系统完成了对二维高速运动目标的跟踪拍摄^[40]。Wang 等人利用扫视镜来构建相机和投影仪之间的动态关系，通过跟踪算法获得运动物体的实时位置，并采用振镜根据位置使运动物体始终位于视场中心，使摄像机的视场能够紧凑地覆盖物体，提高了重建精度^[41]。曹彦鹏等人采用二维振镜进行动态目标的实时跟踪，采用双振镜加双相机协同工作模式，如图 1-2 展示了二维振镜的跟踪系统，跟踪系统采用 X、Y 轴双轴振镜进行大范围跟踪，很好地弥补了现有视觉跟踪平台的范围不足的问题^[42]。

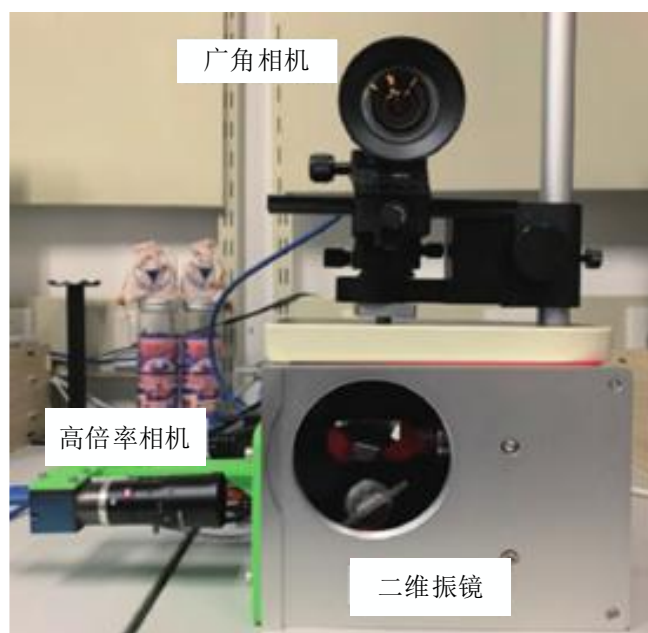


图 1-2 双相机加二维振镜实验设备图

与此同时，随着振镜数量的增加，使单目相机的成像视野可获得不同视角的图像，从而可以达到双目或者多目的效果，从而可以对测量目标进行三维测量和三维重建。大多数人使用单个镜子进行成像，其中包括反射镜、凸面镜、棱镜等，利用其镜面对光线产生的特殊原理进行成像。如 Li 等人^[43]和 Feng 等人^[44]利用单面反射镜构成的振镜系统实现三维测距，其分别对目标直接成像和通过反射镜对目标成像，形成双目视觉，但同时相机的分辨率被极大降低。王力超等人使用

单振镜对近一维三维轨迹进行测量，避免了分辨率的降低，并用机械臂验证其轨迹精度，但也缺少深度信息的测量^[45]。Zhou 等人研究一种将棱镜置于透镜后的系统，通过棱镜的镜面折射率不同，使单张图片的成像光路汇聚到同一区域，以实现立体视觉的效果^[46]。Chen 等人通过在单目相机前放置双球面反射镜，在形成两个视图的同时，通过建立 MBVS 数学模型，初步实现球面反射成像的畸变矫正，该系统扩大了传感器的测量范围，为基于振镜系统的单目测量提供了新思路^[47]。随着人们对单个振镜的研究，由于其视野局限性和复杂程度，人们开始考虑在振镜数量和拍摄方法上进行了研究。如 Chen 等人提出了一种大视场的单相机三维重建，通过在相机光路中放置振镜，在不降低分辨率的情况下，通过振镜旋转生成一系列虚拟相机，使用多视图图像进行三维重建，但由于不是同时对测量目标进行拍摄，只能对静态目标或运动较慢的目标进行三维重建^[48]。王力超等人采用振镜加高速相机进行拍摄测量，拍摄系统光路结构如图 1-3 所示，该系统通过单相机加振镜对高速运动目标进行成像测量，但由于单振镜本身的制约，无法对深度信息进行测量^[49]。

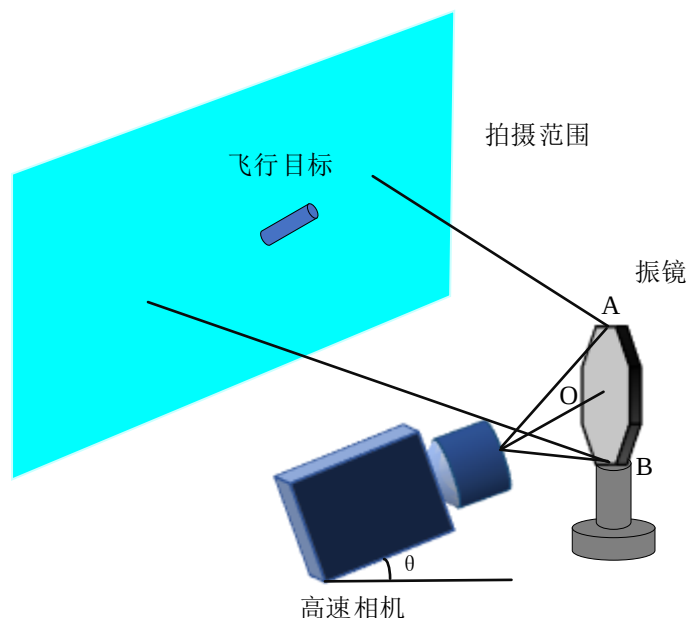


图 1-3 仰角式光路结构示意图

Chen 等人使用两轴振镜扫描仪，通过改变两轴的振镜角度，可以实现大范围的拍摄效果，提出了一种基于 VMOS 内外参标定方法，但由于采用单相机，

无法用于运动目标的深度测量^[50]。Han 等人提出了一种非物理参数成像模型，定量描述了振镜输入参数与三维点在相机成像平面上的成像位置之间的关系，弥补了振镜加相机成像系统缺乏足够的成像模型的问题^[51]。要想对用单相机高速目标进行测量，就要采用同步拍摄的方法。如目前较为常用的通过单相机测距的振镜系统，是 Yu 等人提出的由四反射镜适配器构成的振镜系统，原理图如图 1-4 所示，通过该套振镜系统，标定目标可以通过两种不同的光路分别成像到相机传感器的两边上，并且 Yu 等人对该系统进行优化和验证^[52-53]。

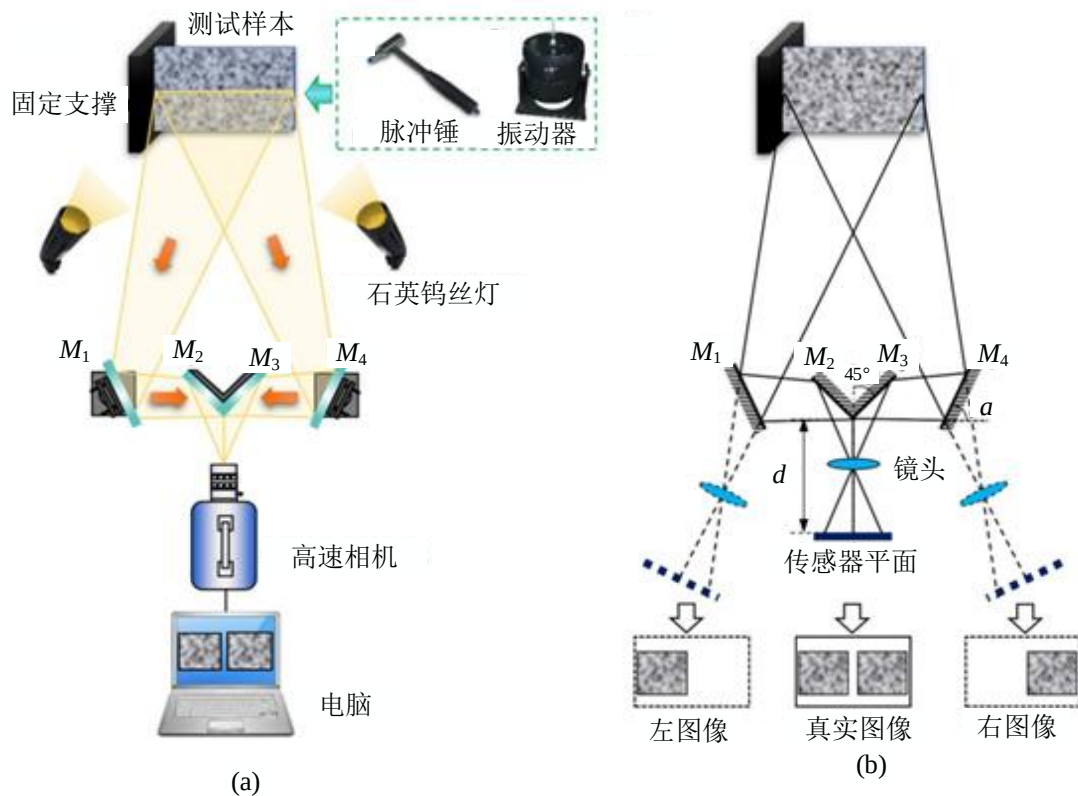


图 1-4 (a)原理图；(b)全场振动测量实验装置的光学布置。

也有人尝试使用多个振镜对同一物体进行成像，如宋等人在相机周围添加多枚平面镜，通过对振镜系统的几何关系研究，使单目相机可对同一目标获取多个视图，实现三维重建^[54]。也有人尝试在振镜的基础上加上其他的光学器件，已达到预期的拍摄效果，如 Zhong 等人利用两个平面镜获得测量目标两个方位的图像，并通过二向色滤波器将两个方位的图像进行分离，可以很好的降低了振镜加入分辨率降低的问题，但同时增加了测量难度和测量误差^[55]。

然而，上述的各种振镜结构都是在固定结构后才可以对固定区域的目标进行

立体视觉，并且由于在一幅图片包含目标的两个视图，其相机的分辨率降低，形成的伪双目结构的测量范围较小。考虑到振镜加相机的拍摄模式可以通过改变振镜角度从而改变拍摄范围，本课题设计了一个双振镜加单相机的高速拍摄系统，既扩大了测量单相机的测量视野，避免了高速目标在成像上的运动模糊，同时为三维姿态测量提供了条件。

1.2.3 三维位姿测量的研究现状

当前，国内外对运动目标位姿测量的方法主要分为两类：位姿内测法和位姿外测法。这两种方法的区别在于测量装置的安装位置，即测量装置是放置于被测目标的内部还是外部。

位姿内测法通过将高精度陀螺仪、加速度计或惯性测量单元等传感器固定于被测目标内部或表面，结合 GPS 测量^[56]、惯性导航系统测量^[57]或超宽带无线电技术^[58]等方法，实现位姿参数的测量。尽管该方法具有较高的测量精度，但其设备成本较高，传感器在安装测量时可能改变目标结构。在某些情况下，尤其是被测目标体积较小时，传感器无法或不允许安装。同时，传感器的引入可能影响目标的飞行状态和运动特性，导致测量结果产生偏差，降低实验数据的参考价值。

位姿外测法是一种基于光测设备对运动目标位姿进行非接触式测量的技术。该方法通过地面安装的光测设备采集运动目标的图像序列，并利用图像处理算法对图像进行分析，最终解算出位姿参数。由于其系统结构简单、成本较低，且不会干扰目标的运动特性，能够精确测量运动目标的三维位姿，因此受到国内外研究人员的广泛关注，并取得了一定的研究进展和实际应用。例如，中国科学院光电技术研究所的魏敏等人在研究轴对称物体的图像序列时，提出了一种改进的中轴线提取方法，成功实现了目标中轴线的自动提取^[59]。国防科学技术大学的丁少闻等人针对靶场中不同位姿的测量需求，综合边缘中心线法和区域主轴法，提出了五种适用于不同场景的中轴线提取方法。该方法在目标图像特征不足、无法提取边缘的情况下，仍能通过区域信息实现目标中轴线的精确提取，显著提升了复杂场景下的测量能力^[60]。赵构等人对弹丸的气动力参数进行了深入研究，采用区域间差法提取弹丸的特征点，重点计算了弹尖和弹尾等关键特征点的位置，并基于这些特征点进一步推导出相关的气动力参数^[61]。乔志旺等人在研究大口径弹

丸运动位姿测量方法时，分析了两点法和三点法的局限性，提出通过边缘提取和直线拟合技术计算弹丸图像中的中轴线，为后续的精确测量提供了可靠的技术支持^[62]。段偲丽基于 ZYNQ-7000 开发平台，设计了一种双目立体视觉弹体位姿测量方法。该方法通过立体匹配与三维重建技术，对弹体目标的中轴线矢量进行拟合，从而精确获取目标的位姿信息^[63]。彭骏等人在研究弹丸图像中轴线提取方法时，综合运用了侧窗滤波、分段线性灰度变换、Otsu 阈值分割和 Canny 边缘检测等图像处理技术，成功获取了目标的边缘轮廓。此外，他们对 ED Lines 直线检测算法进行了改进，从而实现了弹丸目标在像面上中轴线的精确提取^[64-65]。赵全兴等人使用通过边缘直线提取来确定中轴线，从而对飞行目标位姿进行测量^[66]，中轴线提取的效果图如图 1-5 所示。

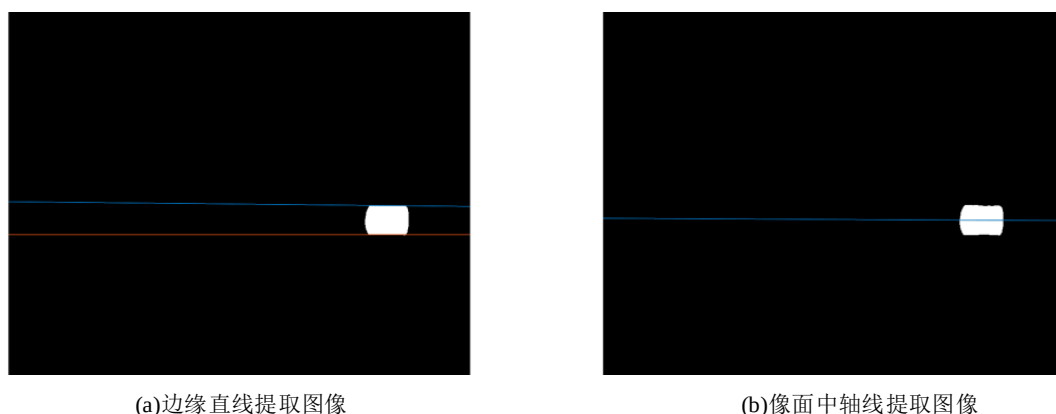


图 1-5 边缘直线及像面中轴线提取效果图

也有人通过提取图像上特定的信息来测量目标的位姿，如 Zhang 等人对图像使用径向约束方法和三维坐标变换的方法，提取单张图像中包含五个编码地标点来计算无人机姿态角^[67]。Guo 等人使用在刚体和世界坐标系中对称排列的六个以上的非共面控制点，获得相机和两个坐标系之间的旋转和平移矩阵，并测量刚体的绝对位姿^[68]。上述方法与 PNP 算法类似，PNP 算法是一种通过 3D 到 2D 点对关系求解相机坐标系相对于世界坐标系位姿的方法。1981 年，Fischler 等人首次将 RANSAC 算法应用于位置确定问题（LDP），为后续研究奠定了基础。给定一张图像，描绘了一组具有已知位置的地标，确定从中获取图像的空间中的点^[69]。2003 年，Gao 等人分别采用代数方法和几何方法来解决透视三点（P3P）问题^[70]。2009 年，Lepetit 等人提出了一种非迭代的 PnP 问题解决方案，通过 n 个 3D 到

2D 点对应关系估计校准相机的位姿。该方法的计算复杂度随 n 线性增长，其核心思想是将 n 个 3D 点表示为四个虚拟控制点的加权和^[71]。2014 年，Kneip 等人提出了一种 PnP 解决方案，首次将计算复杂度、几何最优性、全局最优性、结构简并性和解数量标准等理想特性统一到单个算法中^[72]。2017 年，Brachmann 等人开发了一种基于深度学习的 RANSAC 定位方法^[73]。2021 年，Zhang 等人提出了一种新方法，通过从立体图像中提取相交线计算平面参数，具体步骤包括从立体相机的左右图像中提取线段，进行立体匹配，计算线的端点和方向矢量，最终推导出两条相交线所在的平面^[74]。

随着测量技术的不断发展，基于结构光的三维测量方法逐渐成熟。纪运景等人利用线结构光投影的计算机视觉技术，设计了线结构光旋转扫描视觉子系统，并采用缺失区域自适应灰度增强的光条纹中心线提取算法，实现了高精度的三维视觉测量^[75]。随着深度学习技术的普及，李洪儒等人将深度学习与结构光技术结合，实现了全方位的三维测量^[76]。苗成桐等人针对结构光系统中的非线性问题以及离焦条纹导致的相位误差差异，提出了一种基于相位梯度的分区域相位误差自校正方法，有效提升了测量精度^[77]。

以上测量方法中位姿外测法增加的传感器会影响测量精度，常规的中轴线法，在立体测量中存在视差，中轴线与边缘的交点也就存在一定的偏差，从而影响测量参数的误差，PNP 的方法需要已知的世界坐标，结构光等方法需要借用外部设备。本文基于现有的中轴线的方法，使用单相机，结合特征点提取，通过特征点来进行三维位姿测量，规避了外部设备的影响和立体测量的视差。

1.3 本文的主要研究内容及章节安排

1.3.1 主要内容

本文是基于双振镜系统的高速运动目标三维位姿测量方法研究，主要研究内容包括：

(1) 高速运动目标测量系统设计，采用仰角相机加双振镜的测量结构获得测量图像，单相机避免了双目或多目获取图像同步的问题，双振镜可以让单相机形成立体视觉的测量结构，获得测量目标深度信息的同时，避免了高速目标的运

动模糊，扩大了测量范围。

(2) 对双振镜运动模型进行分析，采用几何和 VBC 外参估计的方式对双振镜的运动模型进行研究对比，从而给运动目标的测量提供了基础条件。

(3) 三维位姿测量方法研究，采用初始位姿和相对位姿测量分开测量，初始位姿在精度为优先的前提，采用中轴线的测量方法，相对位姿测量是基于初始位姿进行测量，其测量方法主要是点云匹配。

(4) 搭建实验平台，对测量系统和测量方法的精度进行验证，对高速运动目标进行测量。

1.3.2 章节安排

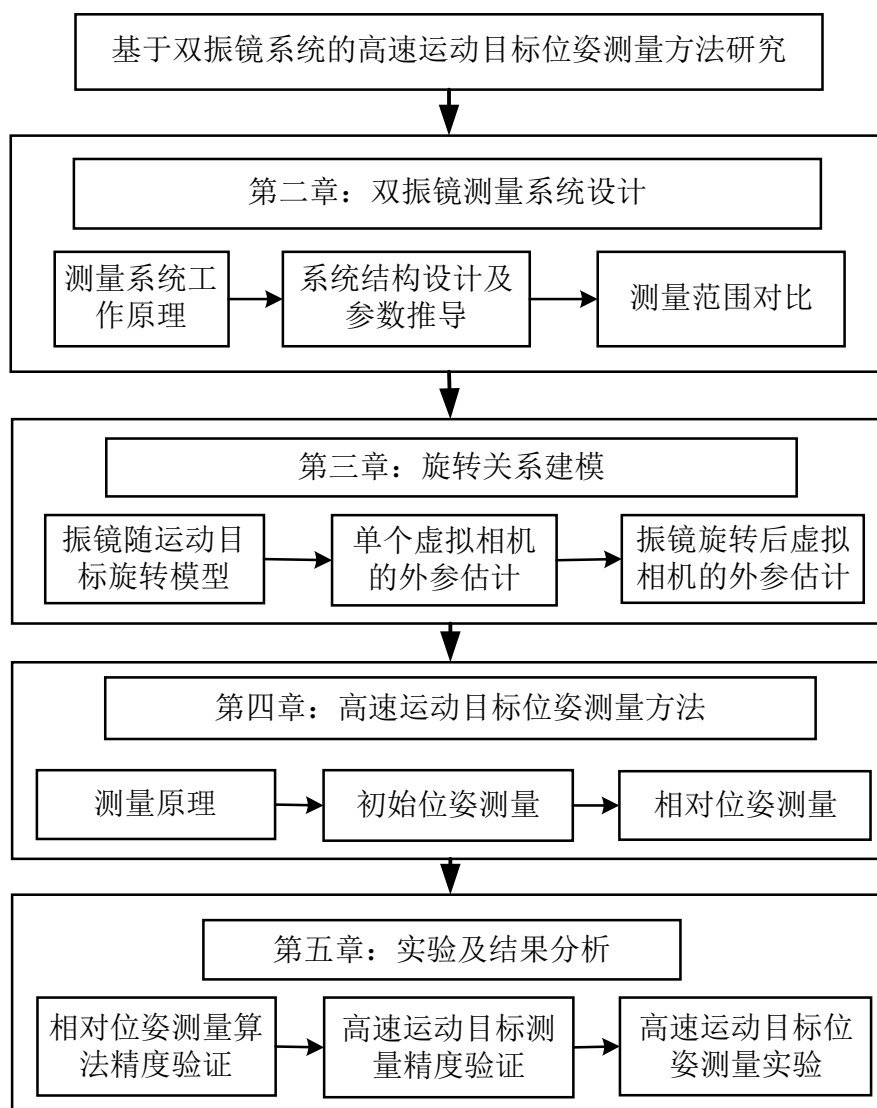


图 1-6 技术路线图

本文的技术路线图如 1-6，加上绪论共有六个章节，每个章节具体结构安排如下：

第 1 章：绪论。主要介绍了高速运动目标三维位姿测量的应用背景和研究意义，概括了当前的相关测量技术，并对本文的主要研究内容和章节安排进行了概述。

第 2 章：双振镜测量系统设计。主要介绍了高速目标测量系统的工作原理，系统组成，振镜的旋转曲线计算，光路结构设计等内容。

第 3 章：振镜旋转关系建模。主要介绍了双振镜随着运动目标的运动而发生旋转。推导了几何和 VBC 的外参估计的方法计算虚拟相机之间的外部参数。

第 4 章：高速运动目标的位姿测量方法。主要介绍了目标三维测量方法，在获得振镜旋转关系后，可以获得测量目标的三维信息，分别详细的介绍了初始位姿测量和相对位姿测量方法。

第 5 章：实验及结果分析。首先在实验室搭建单相机加两个合适的振镜对三维位姿测量算法进行验证，证明拍摄系统的有效性和测量方法的精度。最后，对高速运动目标进行跟踪拍摄，通过位姿测量算法对高速目标进行位姿测量。

第 6 章：总结与展望。对本文的工作和研究内容进行总结和分析，并对研究中出现的不足提出建议和展望。

第2章 双振镜测量系统设计

2.1 本章引言

要通过视觉对高速运动目标进行三维位姿测量，需要获得清晰的高速运动目标图像，常规的拍摄系统对高速运动目标成像会产生残影，得到的图像无法用于测量。为了获得清晰的运动目标图像，本文设计了一种基于单相机加双振镜的拍摄系统，相机以仰角的方式放置于水平面上，以获得更大的测量范围，振镜随高速目标的旋转可以很好的避免运动模糊残生的残影，得到清晰可用于测量的图像。同时，单相机在不借助外部条件的情况下成像是一条射线，无法得到测量目标的深度信息。为了针对单相机无法测量目标深度，本文基于振镜可以改变光路的原理，选择通过增加振镜数量的方式，在单相机上成像面形成测量目标两个方位不同的图像，得到立体视觉的测量效果，从而可以对测量目标进行三维测量。本章主要从测量系统的工作原理，光路结构图，振镜系统的结构参数，以及双振镜系统的测量方位及测量范围这几方面进行介绍与推导。

2.2 测量系统工作原理

要确保目标始终保持在相机视场内，需要振镜的转速与目标的移动速度相匹配。因此，首先需利用光纤传感器组成的测速系统获取运动目标的初始速度。该系统会将信号传输至单片机进行处理，得出目标的初始速度，并依据建立的振镜运动曲线模型计算出振镜的角度变换曲线。随后，将计算得出的角度转换为电信号输出，从而控制振镜旋转，并触发高速相机记录目标飞行的全过程。振镜的作用使得目标在相机视场内相对静止，消除了因高速运动导致的图像模糊，同时扩大了拍摄范围，得到了高速飞行目标的大视场高分辨率图像。

在振镜控制方案中，主要有两种方法。第一种方案是采用一个光纤传感器作为触发装置，系统根据目标的预计运动速度确定振镜的旋转角度曲线，并存储在控制系统中。当目标经过光纤传感器时，触发振镜按照设定的运动曲线进行旋转，从而实现对目标的稳定拍摄。这种方法设计简单且易于实现，但缺点在于使用不

便，需提前了解目标的初始速度并进行曲线计算，不同目标需重新计算振镜的控制角度，且控制器需有足够的存储空间来保存振镜的角度信息。此外，当预估速度不准时，可能导致目标脱离相机视场。第二种方法则是采用两个光纤传感器，当目标移动经过第一个传感器时开始计时，经过第二个传感器时计时结束。通过传感器之间的距离和目标的运动时间，可以计算出目标的飞行速度，并传输至系统控制器。控制系统会根据速度计算振镜的旋转曲线，从而实现对不同速度目标的有效跟踪。相比之下，这种方案具有更高的通用性和灵活性，可以对各种飞行速度的目标提供良好的跟踪性能。综上所述，本文选择选用第二种方法。

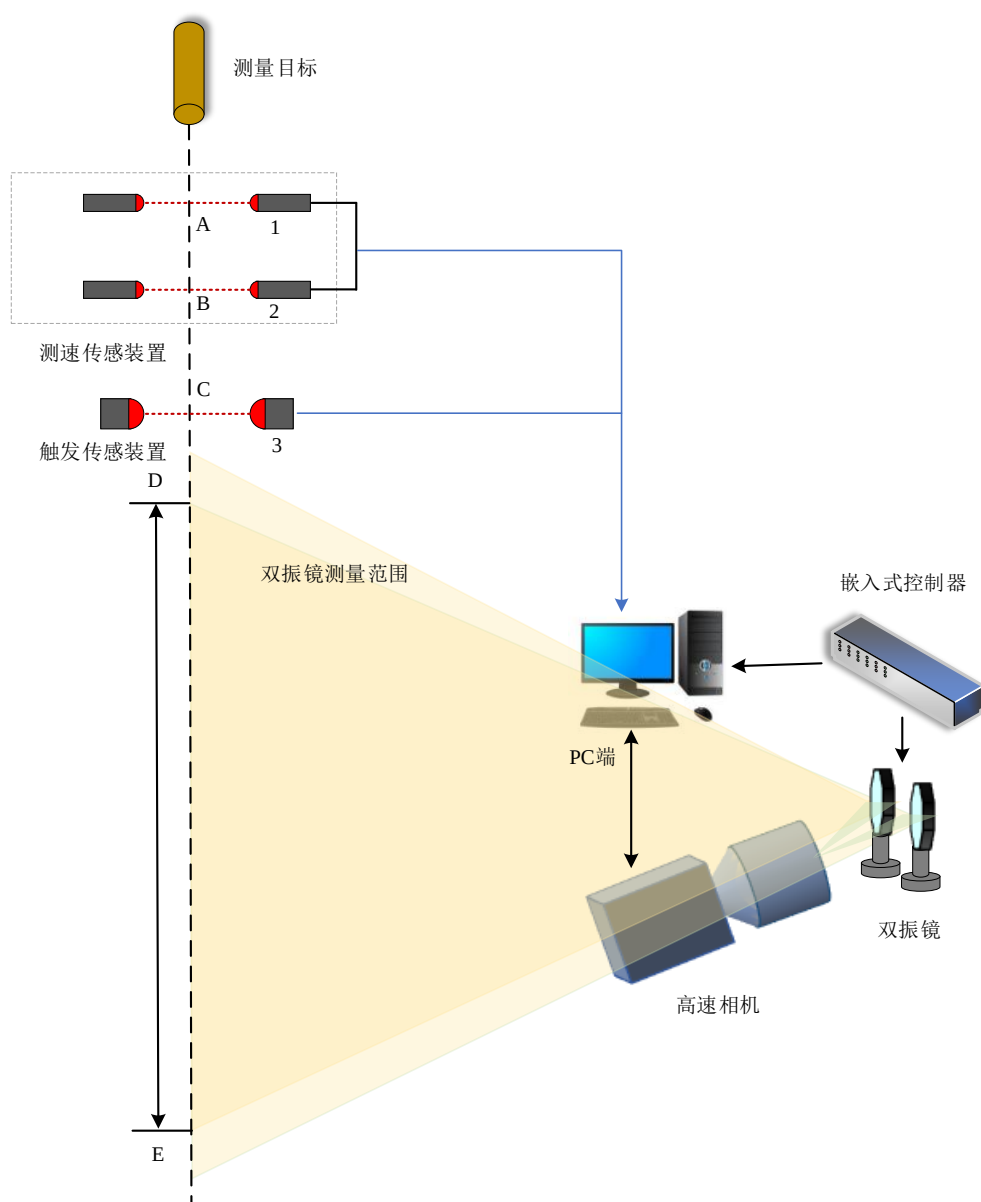


图 2-1 高速运动目标测量系统结构图

测量系统的结构如图 2-1 所示,该系统的组成部分包括:激光测速系统、嵌入式控制系统、双振镜系统和高速相机系统。激光测速靶 1 和靶 2 构成测速系统。当目标被发射并进入飞行状态后,首先会穿过激光靶 1,触发控制系统启动定时器记录时间。当目标经过靶 2 时,计时结束。结合激光靶之间的距离与目标飞行时间,可以计算目标的飞行速度。假设目标在飞行过程中不受外界干扰,且保持匀速直线运动。在得出飞行速度后,控制系统根据推导出的振镜旋转曲线方程,用于计算振镜的位置,并将其转化为控制信号,以便振镜与目标保持相对静止,减少目标与相机视场的相对位移,消除高速运动导致的模糊现象。

然而,从计算目标飞行速度到依据振镜控制曲线方程得到每个位置点的时间会产生一定延时。因此设置 BC 段作为系统的延时段,以确保准备下一步操作的充足时间。在 C 点,设置激光靶 3,主要用于提供振镜开始旋转和相机开始记录的触发信号。拍摄开始后,DE 段为高速相机记录双振镜系统的重复段,记录目标飞行的过程。系统采用检流计扫描振镜,通过电压控制其运动,不同电压对应不同位置。在跟踪过程中,控制系统按一定时间间隔发送电压信号,以控制振镜达到预定位置,使高速相机的视角能够始终跟踪拍摄目标,从而获得清晰的目标运动图像,以便后续测量与分析。

2.3 系统结构设计

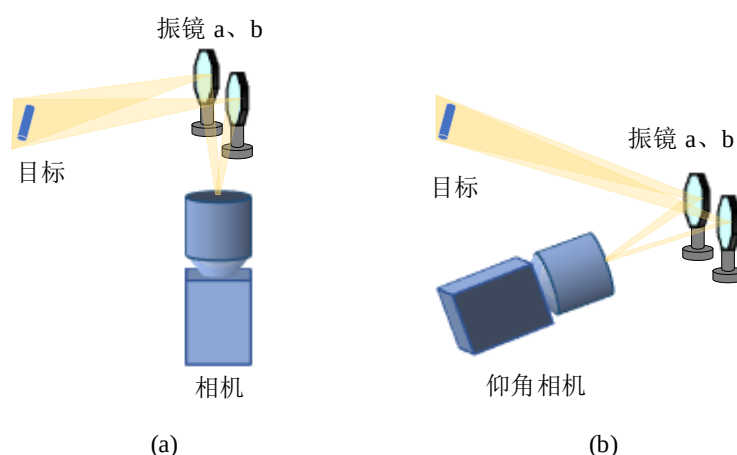


图 2-2 单相机加双振镜放置图: (a)水平放置模式; (b)仰角放置模式。

如图 2-2 所示,双振镜加单相机有两种放置模式,水平放置模式和仰角设置

模式。该系统采用仰角式相机，相比于传统水平放置的相机与振镜的组合，水平方式的相机本体与双振镜存在一定的遮挡，在保证振镜可以在像素平面呈现清晰的图像的情况下，会导致振镜转动的角度受到一定的限制，从而测量范围受限。而通过将相机与水平面呈一定的仰角可以避免相机本体遮挡的问题，从而获得更大测量范围。同时要使单相机形成立体视觉，需要增加振镜的数量，同时振镜数量的增加会减少同一振镜角度的成像视觉，从而拍摄视野会降低，通过旋转振镜的角度和控制振镜的增加数量可以解决这一问题。

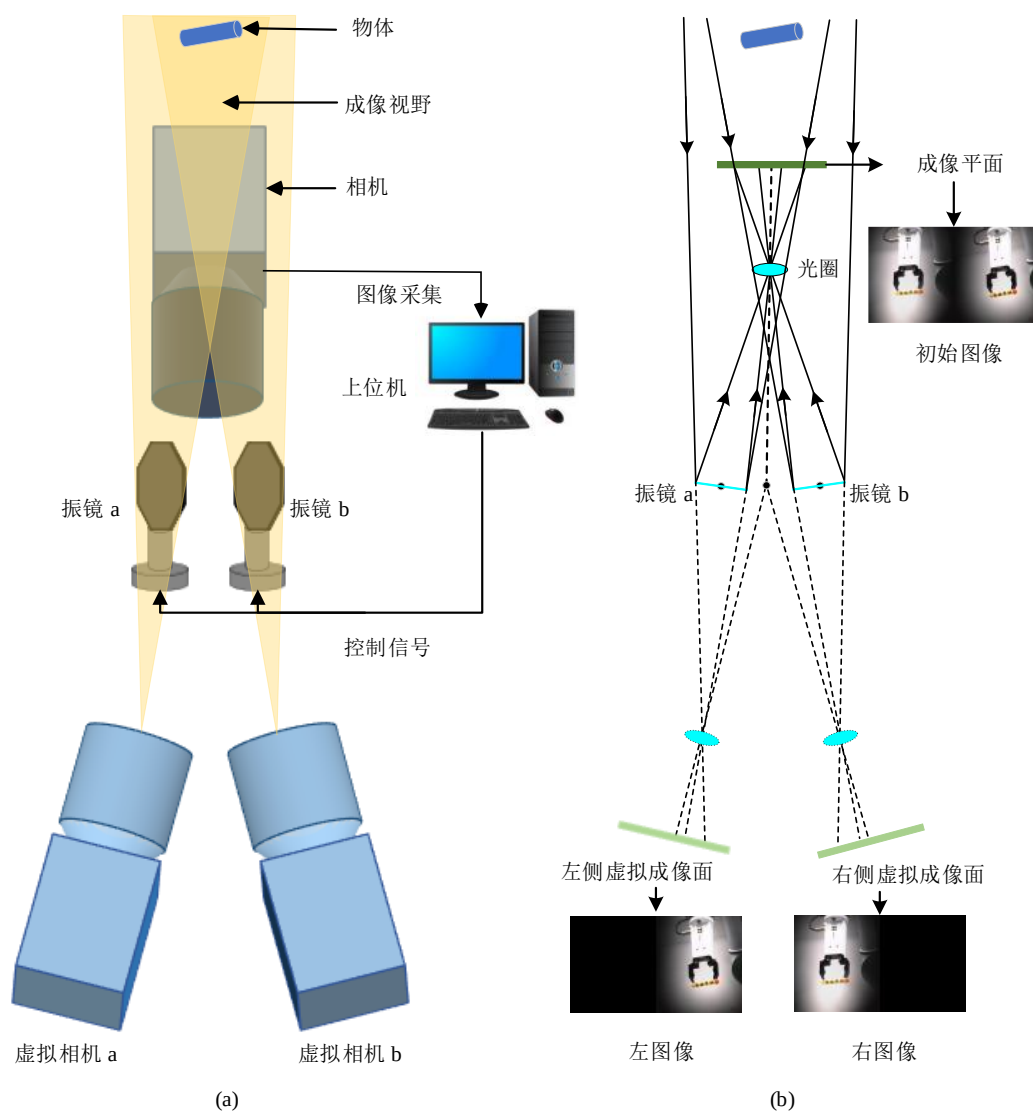


图 2-3 测量系统布置图：(a)测量系统示意图；(b)光学布置。

如图 2-3 所示，基于上述的仰角相机，采用双振镜来增加单相机的测量角度，单面振镜仅投射到成像面的一侧，从而使单相机形成立体视觉的效果。同时通过

控制可旋转振镜调整测量视野，从而实现大范围三维测量。可以通过调整两个振镜与相机之间的相对位置，确保两个振镜投影到相机成像面在不同两个区域，从而不会产生叠影。

若随着振镜数量地增加，对应的虚拟相机数量也在增加，形成对同一目标不同方位地图像数量也在增加，会有多目测量地效果。但由于相机本体固定，对同一物体测量，其旋转角度有限，拍摄图像重叠率较高，并不会获得太多地目标信息，反而振镜数量地增加，会大大降低每个振镜投影到相机成像面地区域大小，从而对一些体积大些地物体无法完成成像，并且多振镜地旋转控制难度也在增加，影响该系统对测量目标地跟踪成。因此在满足单相机立体视觉又尽量保有单个振镜地可用成像区域，选择采用单相机加双振镜的模式是较好的一种选择。

同时，由于拍摄模式不是通过相机直接得到物体图像，双振镜的旋转可以很好的避免高速运动物体造成的残影，从而提高物体图像的清晰度。如图 2-4 所示，对同一高速运动物体，左侧由未旋转振镜拍摄得到的图像明显出现了残影，相对的右侧是旋转振镜拍摄得到的图像，相对于左侧图像的模糊，右侧图像更加清晰，从而可验证在高速目标成像过程中，通过旋转振镜能获得更加清晰的图像。



图 2-4 不旋转振镜和旋转振镜的对比图：图像左侧是振镜没有旋转拍摄到的图像，图像右侧是旋转振镜拍摄到的图像

2.4 系统结构参数推导

2.4.1 相机仰角及振镜高度推导

在上述的单相机加双振镜测量模型中，本小节通过侧视图的几何关系对相机与振镜的仰角 λ 范围和振镜高度 h_m 进行分析。同时，考虑到双振镜有着相同的结构参数，本小节就振镜a的结构参数进行分析。

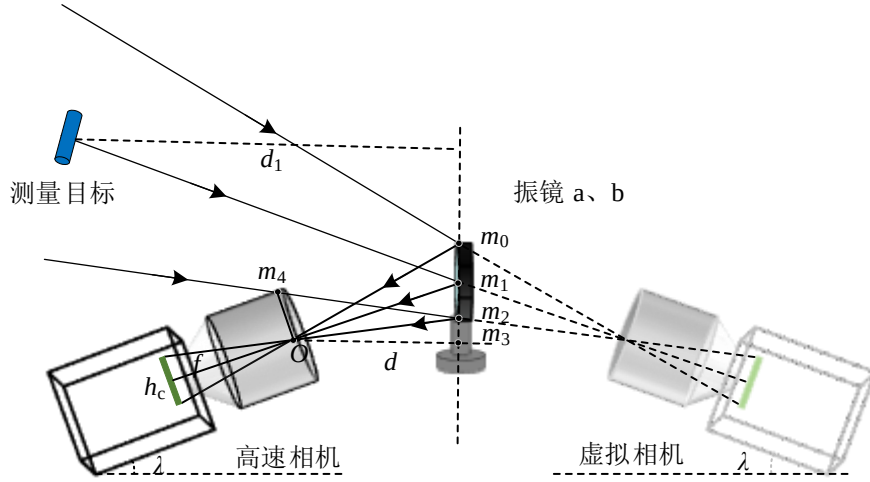


图 2-5 振镜结构光学原理侧视图

在图 2-5 中，在确定高速相机型号的情况下，焦距 f 和成像面的高度 h_c 为定值， $h_m = m_0m_2$ 为振镜的高度。假设振镜的高度 h_m 可通过振镜反射光线占满相机的成像平面 h_c 确定， λ 为相机的仰角度数， d 为相机光心到振镜的垂直距离，且与振镜相交于 m_3 点， d_1 为测量目标到振镜的距离， m_0 为振镜的上端， m_1 为相机中线与振镜的交点， m_2 为振镜的下端， m_4 为振镜的最下端反射光线与相机本体最上端发生遮挡的零点， O 为相机的光圈。

在相机选型确定后，焦距 f 和成像面的高度 h_c 为可测量的，可通过定值来推导几何关系中的其它参数，可得到以下公式：

$$\left\{ \begin{array}{l} \angle m_1Om_3 = \lambda \\ \angle m_0Om_1 = \angle m_1Om_2 = \arctan\left(\frac{h_c}{2f}\right) \\ \angle m_2Om_3 = \lambda - \arctan\left(\frac{h_c}{2f}\right) \\ \angle m_0Om_3 = \lambda + \arctan\left(\frac{h_c}{2f}\right) \end{array} \right. \quad (2-1)$$

随后可以通过 $m_0m_3 - m_0m_2$ 来确定振镜的高度 h_m :

$$h_m = d \cos(\angle m_0Om_3) - d \cos(\angle m_2Om_3) \quad (2-2)$$

结合公式(2-1)与公式(2-2)，可分析出振镜的高度 h_m 与相机光心到振镜的垂直距离 d 呈正相关，与仰角 λ 呈负相关。下一步分析仰角 λ 的范围，当仰角 λ 不断减小，振镜最下端的反射光线会与相机本体最长端出现遮挡的情况，此时仰角 λ 取最小值。图 2-5，通过三角形 ΔOm_2m_4 来分析 λ 的最小值， ΔOm_2m_4 是振镜最下侧反射光线与仰角相机本体刚好产生遮挡的临界三角形，对应的几何关系如下：

$$\begin{cases} Om_2 = d \cos(\angle m_2Om_3) \\ \angle Om_2m_4 = \pi - 2(\frac{\pi}{2} - \angle m_2Om_3) = 2\angle m_2Om_3 \\ \angle m_4Om_2 = \frac{\pi}{2} + \angle m_1Om_2 \\ \angle m_2m_4O = \pi - \angle Om_2m_4 - \angle m_4Om_2 \end{cases} \quad (2-3)$$

其中 Om_4 是相机镜头的圆半径，在知道 ΔOm_2m_4 两个边三个夹角后，可通过正弦定理建立仰角 λ 和 d 的关系如公式 (2-4)，确定倾角的最小值为 λ_1 。

$$\frac{Om_4}{\sin(\angle m_4m_2O)} = \frac{Om_2}{\sin(\angle m_2m_4O)} \quad (2-4)$$

倾角 λ 的最大值，通过目标距振镜的距离 d_1 来确定，当目标固定大小 h_0 ，随着深度 d_1 的增加，目标在成像平面的成像大小不断缩小，理论当成像大小足够小，目标图像无法处理，假设此时在成像平面目标的大小为 h_1 ，如图 2-6 是相机仰角达到最大值时的示意图。

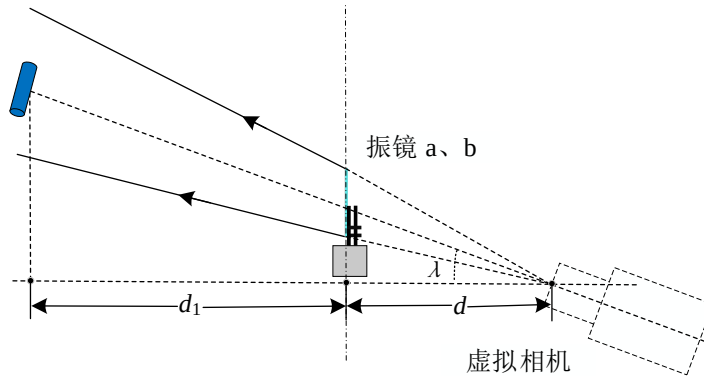


图 2-6 相机最大俯仰角 λ 示意图

通过余弦定理可算出的目标在相机坐标系下的深度，随后通过相似原理可确

定 λ 的最大值 λ_2 ，具体公式如下：

$$\frac{(d + d_1) \cos(\lambda_2)}{f} = \frac{h_0}{h_1} \quad (2-5)$$

通过以上推导可得到振镜的高度 h_m ，以及相机相对于双振镜之间的仰角范围 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 。

2.4.2 双振镜的摆放位置推导

在俯视图中，可确定振镜 a、b 的宽度 w_m 和双振镜的放置位置。为保证两个振镜无论怎么旋转振镜的反射区域都在成像平面上。首先，为保证双振镜拥有同样的成像视野，通过小孔成像原理，可确定当振镜 a、b 在相机中轴线的两侧，则在相机的成像平面上，振镜 a、b 反射的图像也在图像的两侧，故可以保证振镜 a、b 都存有一定成像区域。

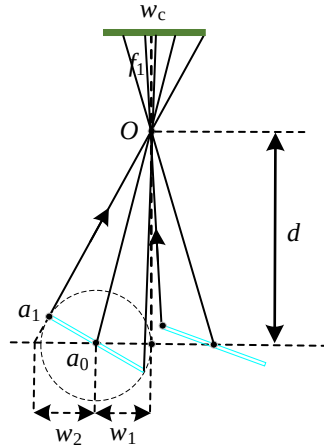


图 2-7 双振镜结构俯视图

在图 2-7 中，其中 w_c 为成像平面的宽度， f_1 为焦距 f 在水平面的投影， $f_1 = f \cos(\lambda)$ ， d 为相机光心到振镜垂直距离， w_1 为左侧振镜区域的内切圆的半径， w_2 为振镜中点到三角形边缘的距离，通过几何可计算 w_2 如下：

$$w_2 = \frac{d \cdot w_c}{2 f_1} - w_1 \quad (2-6)$$

随后建立内切圆内的三角形和两个外部三角形的相似关系如下：

$$\frac{w_1}{\sqrt{(w_2)^2 - (w_1)^2}} = \frac{d}{w_1 + w_2} = \frac{2 f_1}{w_c} \quad (2-7)$$

通过上述方程可确定 w_1 和 w_2 的大小，在这种相切的情况下振镜的最大值小于 $2w_1$ ，当振镜的大小等于 $2w_1$ 时，两个振镜在平行于相机平面会发生碰撞，其次振镜中心放置的最佳位置是垂直距离相机中轴线为 w_1 位置。

2.5 测量范围对比

高速运动目标测量系统的成像方式是通过振镜将目标图像反射到相机上。为了保证拍摄的视场大小和拍摄范围，必须对测量系统的光路结构进行优化设计。在振镜与相机的组合中，传统的光路设计通常采用平行式结构，同时结合双振镜，如图 2-2(a)所示，在这个结构中，相机与双振镜位于同一轴线上，通过双振镜的左右旋转来捕捉运动目标的图像，由于相机本体遮挡对视野产生了影响，需要对原有水平放置模式进行优化。相对于传统的水平放置模式，将相机与双振镜呈现仰角放置，由于成像视野是按照仰角斜向上的，入射光线避免了被相机本体遮挡的情况，可以很好的提升测量系统的测量方法。最后通过控制变量法就相机水平放置加双振镜和相机仰角放置加双振镜的视野进行对比。

仰角相机加双振镜测量视野限制条件：测量结构，在分析双振镜的旋转范围时，需要满足以下两个条件。首先必须保证双振镜的入射光线到同一目标点。双振镜只有对同一目标进行成像，才可以对测量目标进行深度测量。其次两个振镜在旋转时会出现自身遮挡的问题。双振镜的旋转轴在同一水平线，在对同一目标进行成像时，后面的振镜的入射光线会被前面振镜的本体挡着。

随着运动目标的水平方向移动，振镜 a 随振镜 b 而改变视野，从而使两个振镜都能达到跟踪拍摄运动目标。假设物体在振镜上的光路投影占振镜宽度的一半，成像区域才足够对测量目标进行测量，也就是后面振镜 a 中心的入射光线刚好被前面振镜 b 的本体遮挡，此时为双振镜系统的可测量范围。

如图 2-8 所示，则物体在测量范围最右侧的光路过振镜 a 和振镜 b 的中点 a_0 和 b_0 ，当振镜达到最大旋转角度，振镜 a 的中心光路 a_0 刚好过振镜 b 的最左侧 b_1 。以振镜 b 与相机宽度垂直，也就是振镜 b 旋转角度为零建立坐标系，则振镜 b 的中心 b_0 为坐标系原点，以振镜 b 水平方向为 x 轴，垂直于振镜水平面为 z 轴。双振镜摆放位置以 2.4.2 推导的情况为准， w_m 为振镜的宽度， d_2 为测量目标到坐标

系的垂直深度, 其余参数为系统几何参数, 通过分析可得到以下几个坐标, $b_0(0,0)$, $b_1(-0.5w_m \cos(\Delta b), 0.5w_m \sin(\Delta b))$, $a_0(-w_m, 0)$ 。

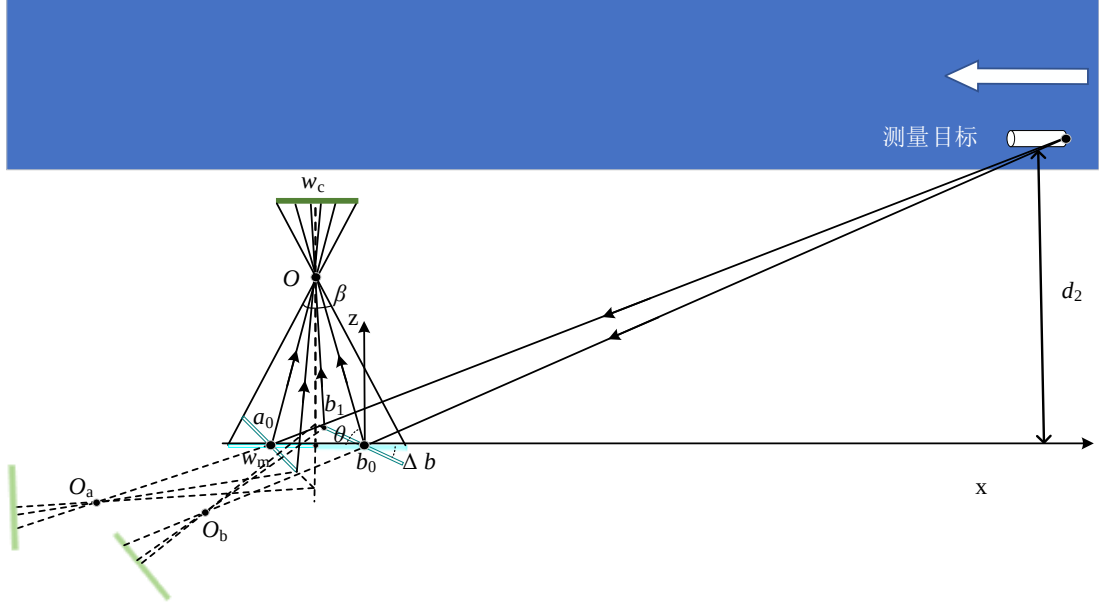


图 2-8 仰角相机加双振镜测量范围分析图

且随着振镜 b 每次旋转 Δb , 振镜 b 对应的虚拟相机旋转 $2\Delta b$, 通过以上条件可以得到 a_0b_1 和 $O_b b_0$ 的直线方程。

$$\begin{cases} a_0b_1 : z_1 = \frac{\sin(\Delta b)}{2 - \cos(\Delta b)}(x_1 + w_m) \\ O_b b_0 : z_2 = \tan(\theta - 2\Delta b)x_2 \end{cases} \quad (2-8)$$

公式(2-8)中, 假设 $z = d_2$ 是测量目标的右侧最大可测量深度, a_0b_1 和 $O_b b_0$ 交于测量目标的最右侧。振镜 a 旋转的最大角度可通过左侧最大可测量深度求、, 从而可得到双振镜的测量范围 β 。

$$\beta = 180^\circ - 2(\theta - 2\Delta b) \quad (2-9)$$

假设单相机的视场角 β 为 60° , 振镜宽度 w_m 为 2cm , 测量目标的深度 z 为 100cm , 代入上式可得到振镜 b 此时的旋转角等于 26.02° , 可得出双振镜的最大视场角为 136.28° , 为单相机的 227% 。

水平相机加双振镜测量视野限制条件: 水平相机加双振镜的测量模式相对于仰角相机多了一个限制条件。首先保证两个振镜反射到同一测量目标。其次两个

振镜在旋转时可能出现自身遮挡和相机遮挡的问题。最后双振镜的入射光线会被相机本体遮挡。下面同样通过建立坐标轴的方法来分析水平相机加双振镜的旋转角度。

在图 2-9 中，在保持和仰角相机相同的测量条件情况下，如在振镜上的光路投影占振镜宽度的一半，才可以对测量目标进行测量。同时把相机的两侧同时算入其测量视野，故相对于仰角相机的测量视野，增加了相机本体遮挡这一情况，故只需要在原有测量范围中去除侧挡的部分就可以了。假设相机成像面宽度和相机镜面宽度一致，且与振镜的大小一致， $w_a = w_m$ ，同时振镜 a 和振镜 b 由于相机本体遮挡产生的测量范围损失一致。

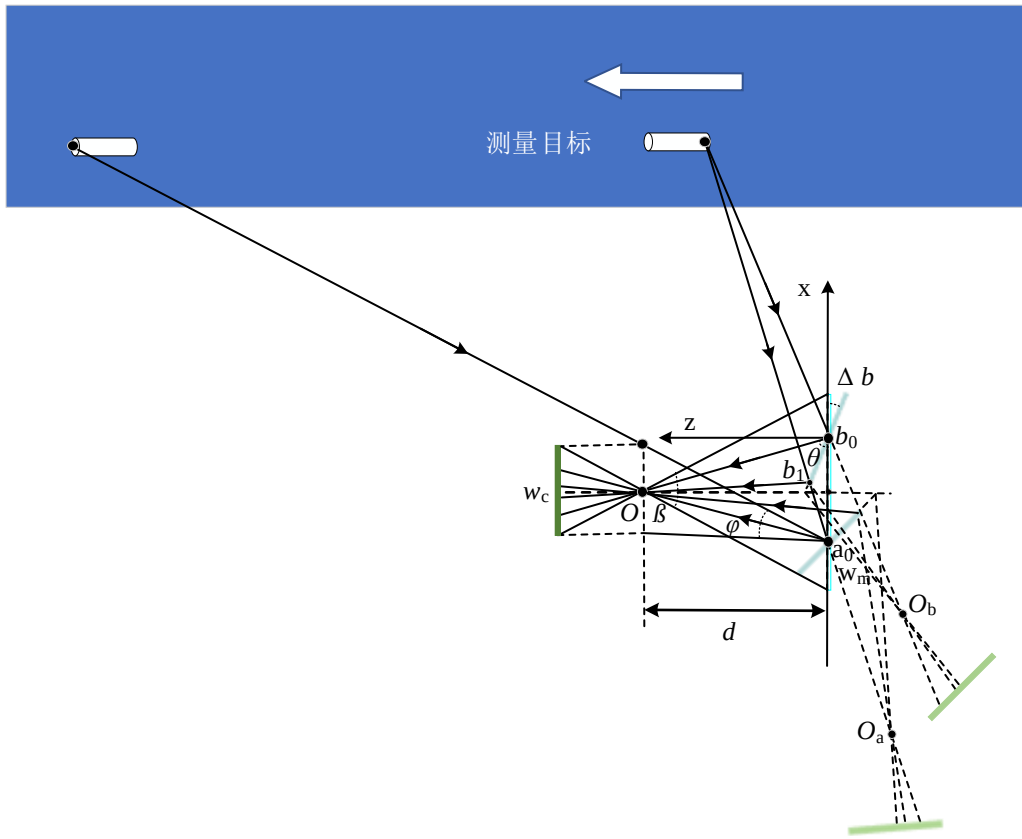


图 2-9 水平相机加双振镜测量范围分析图

通过几何关系可得到相机本体遮挡损失的角度 φ ，从而得到水平相机加双振镜系统的测量范围 β 。

$$\begin{cases} \beta = 180^\circ - 2(\theta - 2\Delta b) - \varphi \\ \varphi = \arctan\left(\frac{w_m}{d}\right) \end{cases} \quad (2-10)$$

与仰角测量范围对比一样，假设单相机的视场角 β 为 60° ，振镜宽度 w_m 为 2cm ，可推算出相机到振镜的垂直距离 d 为 $2\sqrt{3}\text{cm}$ ，可计算出相机本体遮挡损失 $\varphi = 30^\circ$ ，右侧测量目标的深度 z 为 100cm ，代入上式可得到振镜 c 此时的旋转角约等于 30° ，可得出双振镜的最大视场角为 136.28° ，去掉损失的角度为水平相机加双振镜的测量范围为 106.28° ，为单相机的 177% 。

由上述内容可知其测量范围与单相机的视场角 β ，振镜宽度 w_m 和测量目标的深度 z 。通过控制变量对比两个测量结构的测量范围变化规律，设仰角相机加双振镜的测量视角为 β_1 ，水平相机加双振镜的测量视角为 β_2 。

表 2-1 不同结构参数下仰角式和平行式双振镜测量范围对比

$\beta(^{\circ})$	$w_m(\text{cm})$	$z(\text{cm})$	$\Delta c/\Delta b(^{\circ})$	$\beta_1(^{\circ})$	β_1/β	$\beta_2(^{\circ})$	β_2/β
60	2	100	26.02	136.28	2.27	106.28	1.77
30	2	100	29.36	132.70	4.42	117.70	3.92
90	2	100	22.03	141.25	1.57	96.25	1.07
60	1	100	26.05	136.40	2.27	106.40	1.77
60	3	100	25.99	136.16	2.27	106.16	1.77
60	2	50	25.96	136.04	2.27	106.04	1.77
60	2	150	26.04	136.36	2.27	106.36	1.77

由表 2-1 所示，其振镜宽度 w_m 和边缘目标的测量深度 z 对系统测量范围影响不是很大，其相机本身的视场角对该系统的测量范围影响较大，随着单相机视场角的增大，在该系统中，所需振镜的宽度就越大，其双振镜本体遮挡的测量视场就越大，有效测量视场就越小。

2.6 本章小结

本章主要介绍高速运动目标的测量系统和其工作原理，相机仰角范围，振镜之间位置和数量的选择。测量系统通过激光测量靶测量高速运动物体的初始速度，随后由于控制模块控制振镜旋转角度，从而达到对高速运动目标进行跟踪的目的，从而获得更加清晰运动图像，解释了高速旋转振镜可以避免运动模糊的现象。随后就仰角相机加双振镜的结构进行分析，分析单相机与双振镜之间的仰角范围，及振镜的大小，最后就水平放置系统和仰角放置系统的测量视野进行了分析和对比，为后面的具体实验提供了条件。

第3章 振镜旋转关系建模

3.1 本章引言

在振镜静止的情况下，双振镜测量系统可以通过类似双目标定的原理来确定此时双振镜对应的两个虚拟相机内外参，从而可以进行三维位姿测量。然而双振镜随着运动目标的运动，为保证运动目标在拍摄视野内，双振镜需要旋转来改变测量视野，从而两个虚拟相机的位置也发生了改变。同时随着振镜的旋转，测量得到目标的三维位姿处于不同的三维坐标系。本节基于双振镜测量系统存在以上问题，采用几何和 VBC 的外参估计来求得振镜旋转后两个虚拟相机之间的位姿关系，最后通过坐标系迭代的方式将得到的三维位姿统一坐标系，从而对运动目标进行大范围三维位姿测量。

3.2 振镜随运动目标旋转模型

为了实现高速飞行目标的清晰成像，振镜系统在测量系统中扮演着重要角色，是获取清晰图像的关键组件。本节就振镜的旋转模型和虚拟相机位置的变化进行描述，分为运动模型的分析 and 世界坐标系的构建两部分。双振镜模型是由两个单振镜组成，其旋转模型与单振镜旋转模型相似，故本小节由单振镜旋转模型到双振镜旋转模型递进分析。

3.2.1 单振镜旋转模型分析

振镜工作原理基于线圈通电后在磁场中产生力矩，从而控制其旋转。具体来说，振镜内部的电流通过线圈产生电磁力矩，这个力矩使转子偏离平衡位置。当转子偏离位置时，施加在其上的回复力矩与电磁力矩达到动态平衡，转子仅在一个可控的范围内进行摆动而不会连续旋转。振镜的偏转角度与通入电流强度呈线性关系，因此也被称为电流计扫描振镜。这种扫描振镜具备高响应速度、优秀的高速扫描能力以及小角度精确控制等优点，同时其紧凑的设计和轻量化特性，使其在实时跟踪快速运动目标时表现出色。因此，扫描振镜在捕捉高速飞行物体清晰影像方面，成为不可或缺的重要设备。

单振镜是通过单个振镜对测量目标进行跟踪，包括其虚拟相机的变化规律，以及视场角的线性规律。虚拟相机是由振镜的反射成像决定其对应位置，同时由于振镜的旋转，虚拟相机位置轨迹是围绕振镜旋转中心的一个圆形，对同一平面对的目标跟踪是非线性的。振镜 a 与振镜 b 采用同款振镜，其旋转模型是一样的，本节以振镜 a 作为分析，振镜 b 的旋转模型类比振镜 a。

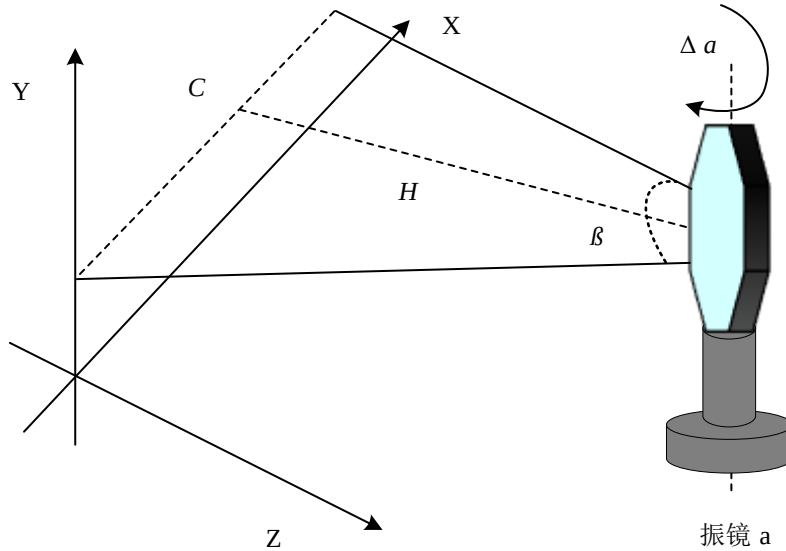


图 3-1 扫描振镜原理图

在图 3-1 中， β 为振镜 a 的扫描视野，且当 $\Delta a = 0^\circ$ 时，振镜 a 到测量平面的垂直距离为 H ，相较于 C 。通过调节扫描振镜 a 的旋转，可以改变相机的视角并将其转换到 X 轴上的特定位置。振镜 a 的偏转角度由电压控制，设定的偏转角度为 Δa ，两者之间的关系可表示为式 3-1：

$$\Delta a = KV \quad (3-1)$$

其中 K 是比例因子， V 是振镜旋转的速度。在电压控制的振镜系统中，通过调整电压的大小来实现对振镜旋转角度的精准控制，从而保持相机对运动目标的持续跟踪拍摄。这一过程的关键在于确保相机视角与目标的运动保持同步，为此需要对振镜的偏转角度 Δa 和相机视角的偏转角度 $\Delta \beta$ 进行精确计算。

当目标以不同速度移动时，为了让相机的视场始终以目标为中心，就必须针对每种速度设计相应的振镜扫描路径。这要求分析振镜旋转角度与目标速度之间的关系，最后通过控制系统发送合适的电压信号。如图 3-2 展示了振镜跟踪阶段的原理示意图。接下来，将基于该图对振镜的旋转模型进行详细推导和分析。通

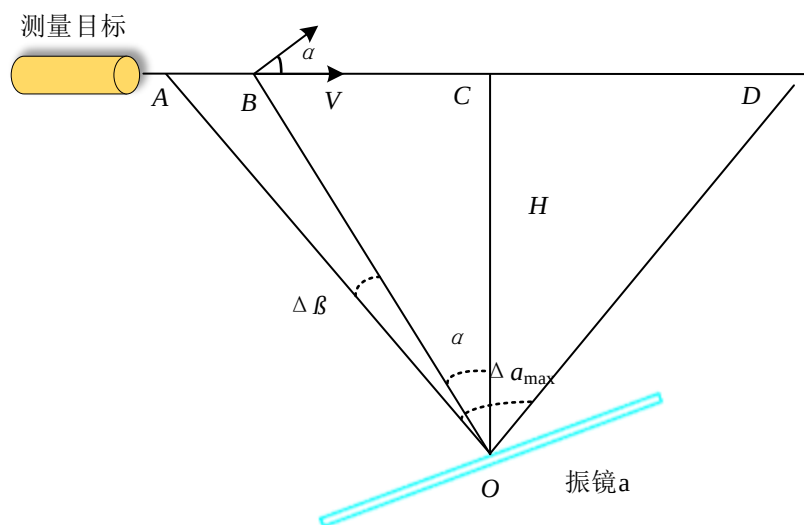


图 3-2 目标跟踪段示意图

在目标进入跟踪阶段后，光纤传感器会发出触发信号，振镜 **a** 开始旋转以跟随目标，确保目标始终位于视场中心。同时，当视野偏离垂直中心，相同改变角度条件下，其可反射的视野会越大。设目标的飞行速度为 V ，振镜 **a** 的最大视场角为 $\Delta\alpha_{\max}$ ，振镜的中心到目标轨迹的距离为 H ， C 为振镜可跟踪轨迹的中点。目标与振镜 **a** 中心的连线被视为相机的凝视线，需要持续跟随目标的移动，凝视线与 CO 之间形成的夹角为 α 。同时，凝视线从 AO 向 BO 旋转的角度为 $\Delta\beta$ ，目标的运动持续时间为 t ，跟踪范围为 AC ，总长度为 S 。根据这些参数设置，计算振镜的运动轨迹。

$$S = 2H \tan\left(\frac{\Delta a_{\max}}{2}\right) \quad (3-2)$$

当目标在 AC 段时, 可求得 BO 与 CO 的夹角 α 。

$$\alpha = \arctan \frac{H \tan \frac{\Delta a_{\max}}{2} - vt}{H} \quad (3-3)$$

当目标在 CD 段时夹角 α 为:

$$\alpha = \arctan \frac{vt - H \tan \frac{\Delta a_{\max}}{2}}{H} \quad (3-4)$$

此时 AO 向 BO 转过的角度 $\Delta\beta$ 为:

$$\Delta\beta = \begin{cases} \frac{\Delta a_{\max}}{2} - \alpha \\ \frac{\Delta a_{\max}}{2} + \alpha \end{cases} \quad (3-5)$$

为了使 AO 到 BO 的角度变化 $\Delta\beta$ 随时间而改变, 需要调节振镜的旋转角度 Δa , 以确保 BO 和 CO 之间的夹角 a 与 $\Delta\beta$ 的关系符合公式(3-5)。 $\Delta\beta$ 与 Δa 的关系如图 3-3 所示。

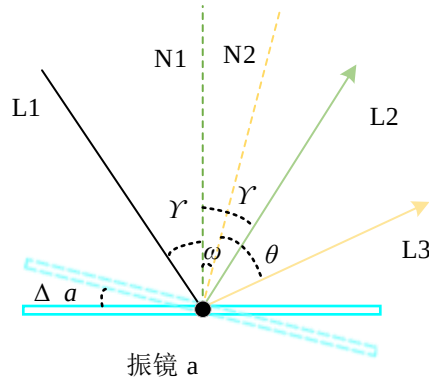


图 3-3 振镜 b 旋转角度与相机视角间的关系

其中 γ 为入射光线 L1 的入射角, 同时反射角也为 γ , 当振镜 a 旋转 Δa 后, 入射光线不变, 入射角为 $\gamma + \Delta a$, 反射角 θ 变为 $\gamma + \Delta a$, 法线由 N1 变为 N2 变化量为 ω , 所以反射光线 L2 与法线 N1 的夹角为 $\gamma + 2\Delta a$, 所以当振镜旋转 Δa 后, AO 向 BO 变换的角度 $\Delta\beta$ 为 2ω 。

所以在图 3-3 中, AO 向 BO 变换的角度 $\Delta\beta$ 时, 振镜 a 的旋转角度为 Δa , 两者关系如公式(3-6)。

$$\Delta a = \frac{\Delta\beta}{2} \quad (3-6)$$

结合式(3-5), (3-6)可得振镜 a 的角度 Δa 与目标运动时间 t 以及速度 v 的关系为:

$$\Delta a = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta a_{\max}}{2} - \arctan \frac{vt - H \tan \frac{\Delta a_{\max}}{2}}{H} \right) \quad (3-7)$$

为了提高跟踪精度, 测量系统需要控制振镜的旋转角度, 使目标始终保持在

相机的拍摄视野中。在振镜控制中，输出的信号是离散的，虽然振镜角度随时间变化可以形成一条连续曲线，但实际控制的点是分开的。为了确定离散控制点之间的时间间隔 Δt ，需考虑目标的运动速度、相机的视场大小以及振镜的阶跃响应时间。

假设测量目标的运动速度为 40m/s，运动高度 H 为 2m，振镜的最大视场角为 90° ，最大跟踪距离为 4m，目标运动时间为 100ms。此外，相机的视场范围设为 80cm。为了保证拍摄效果，目标中心需要始终位于视场的中心区域，并且运动范围不得超过视场宽度的 3/5。因此，系统需要计算得到最大的间隔时间 $\Delta t_{\max}$ 。

$$\Delta t_{\max} = \frac{3w}{5v} \quad (3-8)$$

其中， w 为视场宽度， v 为运动目标速度。通过代入数值计算，得出最大时间间隔 $\Delta t_{\max}$ 为 12ms。为了确保视频拍摄的连贯性及目标的成像尺寸，将时间间隔 Δt 设定为 3ms，振镜 b 角度随时间变化曲线随如图 3-4 所示，振镜 c 的运动模型与振镜 b 一致。

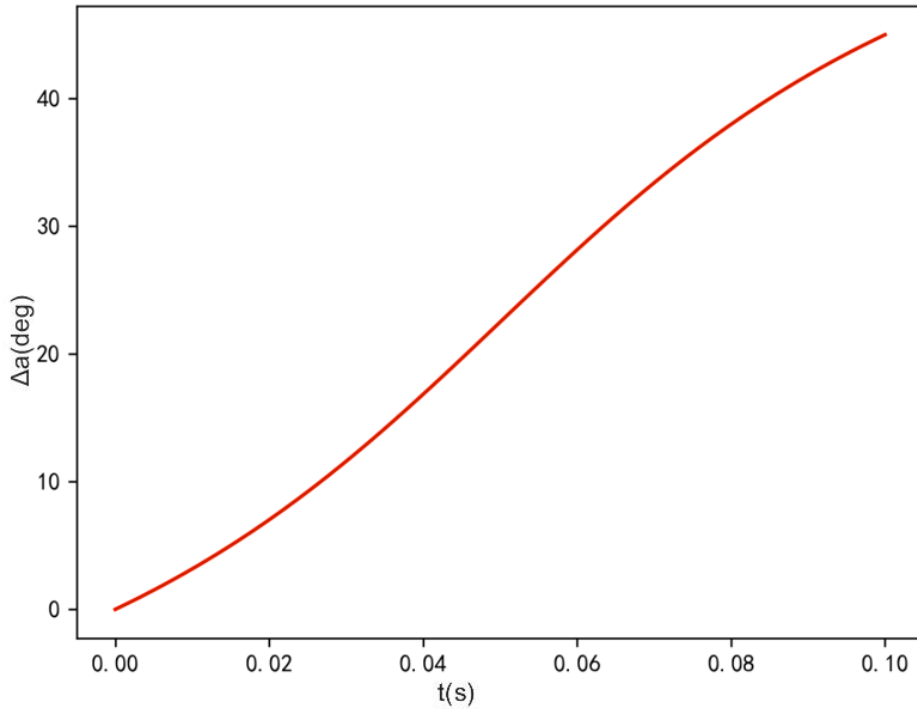


图 3-4 振镜 a 角度随时间变化曲线图

3.2.2 双振镜旋转模型分析

基于上述对单振镜旋转模型的分析，本文采用单相机加双振镜的测量系统，

该系统在双振镜静止的条件下，通过两个振镜在成像面形成两个不同方位的视觉，每个振镜的成像面相当于单个相机的测量视野的一半。为了可以对高速目标进行跟踪测量，扩大双振镜的测量范围，双振镜的旋转是不可缺失的。同时，双振镜系统的测量原理和双目测量类似，在双目相机的三维位姿测量中，需要两个虚拟相机的内参，还需要两个虚拟相机之间的外参。在振镜发生旋转后，虚拟相机的位置会随着振镜的角度发生改变，此时两个虚拟相机的外部参数也在发生改变，静止条件下的外参就无法用于三角测量。基于以上问题，建立了双振镜旋转模型，用于分析运动目标在运动时，振镜发生旋转后，两个虚拟相机外部参数。

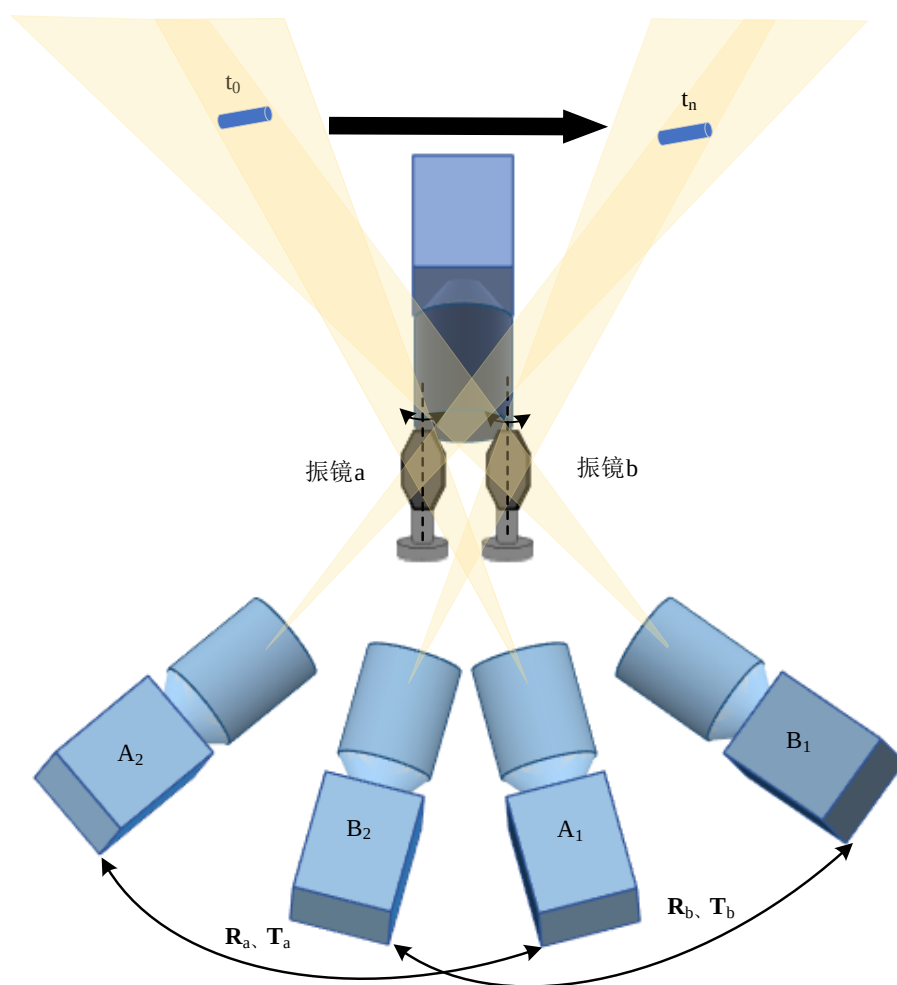


图 3-5 双振镜旋转模型

如图 3-5 所示，双振镜放置位置垂直于水平面，相机的放置位置与水平面呈现一个夹角，从而得到第二章的双振镜测量系统。当振镜随着测量目标的移动而

发生旋转，测量目标从 t_0 时刻运动到 t_n 时刻，为了能够拍摄到测量目标，振镜a发生旋转，振镜a对应的虚拟相机从 A_1 移动到了 A_2 ，振镜c发生旋转，振镜b对应的虚拟相机从 B_1 移动到了 B_2 。单振镜的模型建立是相机的光线中心过旋转振镜的旋转轴，而双振镜测量系统中，相机的光线中心处于两个振镜中间，为分析其几何变化规律，将双振镜的旋转模型投影到水平面上，如图3-6。

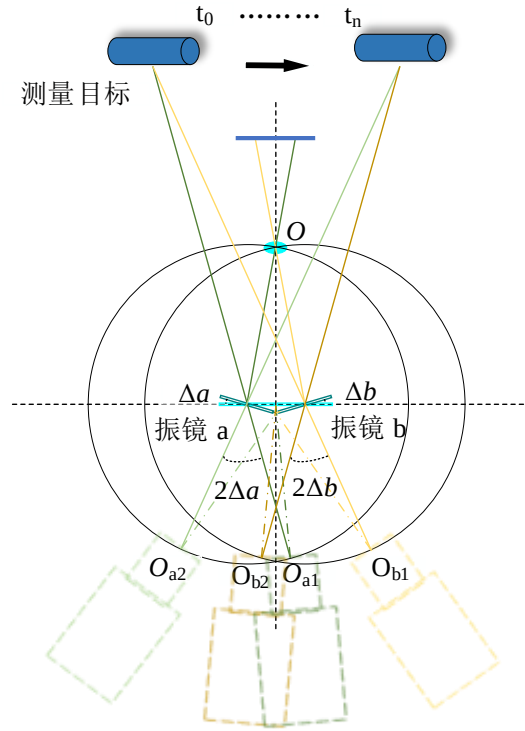


图 3-6 双振镜旋转结构水平投影

如图3-6所示，双振镜的测量模式不是单侧图像对应的虚拟相机，准确来说每个虚拟相机的成像面是与主相机一致，但有效视野只占成像面的一半，故每个虚拟相机的中轴线都不过对应虚拟相机的中心。当振镜a与振镜b都平行于真实相机的成像面水平面时，也就是振镜a与振镜b的角度为零时，振镜a与振镜b处于水平方向，可看作一个振镜，此时两个虚拟相机重合，也就是单相机加单振镜的情况。

除了双振镜系统中双振镜的放置位置在成像面的两侧，其余该系统每个振镜角度变化规律与单振镜模型的一致，其虚拟相机的运动轨迹也为一个圆，圆的中心为每个对应振镜的旋转中心。由此可得，在双振镜系统中，振镜a旋转了 Δa ，对应的虚拟相机绕振镜a旋转了 $2\Delta a$ ，振镜b旋转了 Δb ，对应的虚拟相机绕振镜

b 旋转了 $2\Delta b$ 。

3.3 单个虚拟相机的外参估计

基于上一节的双振镜旋转模型构建，本节研究在双振镜旋转后，虚拟相机坐标系下的三维坐标在世界坐标系下的坐标。在世界坐标系下，双振镜未旋转之前，两个虚拟相机的外参可以通过双目标定获得。通过研究分析表明，在振镜旋转后，两个虚拟相机的外参也可以通过几何或 VBC 外参估计，从而可以用于振镜旋转后的位姿测量。

3.3.1 基于几何的外参估计

由于其虚拟相机是振镜角度是一一对应的，振镜的旋转角度是可知的，虚拟相机的变换规律也是可以推导的。因此，可以通过构建几何模型，利用旋转角度与虚拟相机之间的对应关系，推导出虚拟相机的外参。

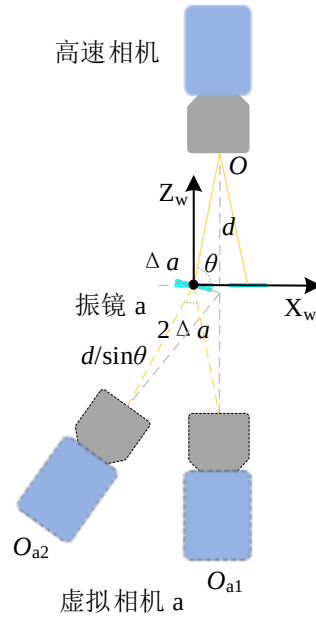


图 3-7 基于双振镜的几何结构

同理，考虑到振镜 a 与振镜 b 的原理相同，采用振镜 a 进行描述。振镜 a 的测量系统在水平面投影如图 3-7，将坐标系建立在振镜 a 的中心， Z_w 为垂直于 Δa 为零时的振镜 a 平面， X_w 平行于此时的振镜平面。假设 O_{a1} 为虚拟相机初始位置， O_{a2} 为旋转后虚拟相机位置，振镜 a 每旋转 Δa ，虚拟相机的旋转为 $2\Delta a$ ，其中 d

与 θ 是几何关系的固定值，则虚拟相机形成的圆形运动轨迹半径是固定值 $d / \sin \theta$ ，则虚拟相机与坐标系的夹角为 $\theta - 2\Delta a$ ，可以通过夹角和固定参数得到 $\mathbf{R}_a$ 、 $\mathbf{T}_a$ 。

$$\mathbf{R}_b = \begin{bmatrix} \cos(2\Delta a) & 0 & \sin(2\Delta a) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(2\Delta a) & 0 & \cos(2\Delta a) \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

$$\mathbf{T}_b = \begin{bmatrix} \frac{d \cos(\theta - 2\Delta b) - d \cos \theta}{\sin \theta} \\ 0 \\ \frac{d \sin(\theta - 2\Delta b) - d \sin \theta}{\sin \theta} \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

实际情况，由于相机和双振镜的安装位置并不容易获得，振镜的旋转轴安装位置并不完全垂直于水平面，同时振镜的制作工艺也会产生一定的影响，这些影响都会对测量系统产生误差。在误差的影响下，振镜的旋转角度会在世界坐标系的各个轴上产生了分角，从而通过几何方式得到的 $\mathbf{R}_a$ 、 $\mathbf{T}_a$ 会有一定的误差，进而影响测量的精度。

3.3.2 基于 VBC 的外参估计

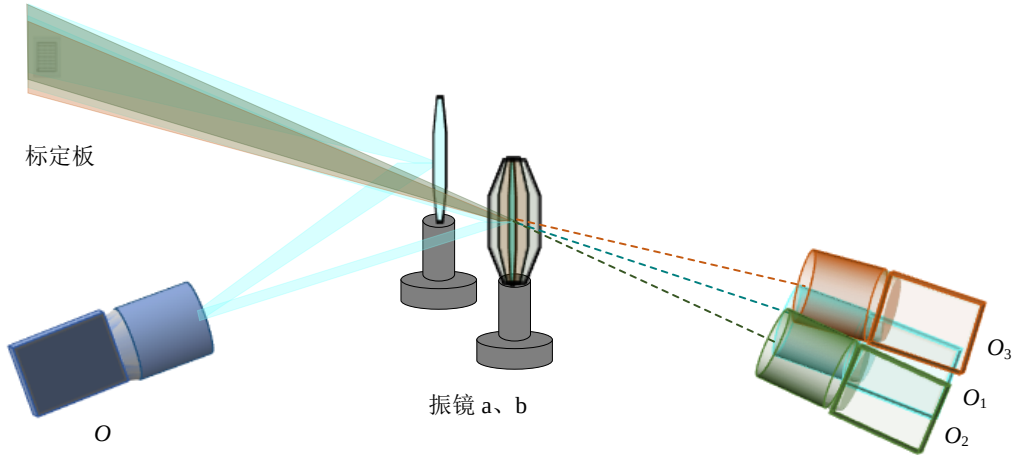


图 3-8 基于 VBC 的旋转示意图

以几何的方式获得相机的精准外参难度较大，很难用于测量系统。然而，虚拟相机的位姿变换具有一定的重复性，如当振镜变换固定角度，其虚拟相机的位姿变换也具有一定的规律，因此只需要去找到这个规律，就可以推导虚拟相机的外参。相对于基于几何的外参估计，基于 VBC 的外参估计利用虚拟相机与旋转

角度具有重复性，其振镜的每次旋转对应的位姿变换是有规律的。

如图 3-8，假设在标定过程中标定板的位置不变，仅仅改变单个振镜的旋转角度，得到不同虚拟相机对同一位置的标定板的成像。利用单相机张氏标定的原理，相机位置不发生改变，移动标定板的拍摄位置可以得到相机的内参和每个标定板相对于相机坐标系的外参。反之，当标定板位置不变，仅仅改变虚拟相机的对应位置，可以得到不同相机坐标系对同一位置标定板的外参。当得到同一位置标定板在不同相机坐标系下的外参，此时其原理与双目标定的原理相似，其公式如下：

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{R}_{n-1} &= \mathbf{R}_n \mathbf{R}_1^{-1} \\ \Delta \mathbf{T}_{n-1} &= \mathbf{T}_n - \Delta \mathbf{R}_{n-1} \mathbf{T}_1\end{aligned}\quad (3-11)$$

首先固定标定板位置，振镜 a 每次旋转固定的角度为 Δa ，进行 n 次标定可得到 n 组虚拟相机相对于标定板坐标系的外参 $(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n)$ 和 $(\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_n)$ 。通过上述公式，可以得到振镜旋转角度与的 $\mathbf{R}_a$ 、 $\mathbf{T}_a$ 线性关系，从而提高 $\mathbf{R}_a$ 、 $\mathbf{T}_a$ 的精度。同理，振镜 b 每次旋转的角度为 Δb ，通过上述方法获得振镜 b 形成虚拟相机的外部矩阵 $\mathbf{R}_b$ 、 $\mathbf{T}_b$ 。该方法的主要思想是通过已有的单相机位姿估计，求得两个虚拟相机之间的外参，绕过测量系统结构上产生的误差，求得虚拟相机的位姿变换，也可以通过 PNP 等方法。

3.4 振镜旋转后虚拟相机的外参估计

世界坐标系建立：在振镜发生旋转后，计算得到的三维位姿处于不同的坐标系下，为了能够清楚的对测量目标的位姿变化进行分析，将不同坐标系下的三维位姿统一到唯一的一个世界坐标系必不可少。但同时为兼顾准确性和测量难度，如何选择一个合适的世界坐标系也十分重要。

如图 3-9 所示，以振镜 a 对应的虚拟相机坐标系为世界坐标系，当振镜 a 于相机成像面的平行时，其对应的虚拟相机坐标系的 X 轴于相机坐标系的水平轴平行。为了更加清晰的分析目标的位姿信息，本文以振镜 a 与相机坐标系的 x 轴平行时，将此刻的坐标系转换为平行于水平面坐标系，以此刻的坐标系为世界坐标系，如图 3-7(a)所示。 λ 为此时的相机仰角，可通过将标定板垂直于水平面，通过标定的方式获得此时的仰角 λ 。通常情况也可以通过标定选择当前相机坐标系

下与运动平面平行的坐标系作为世界坐标系，用于简单的运动分析。

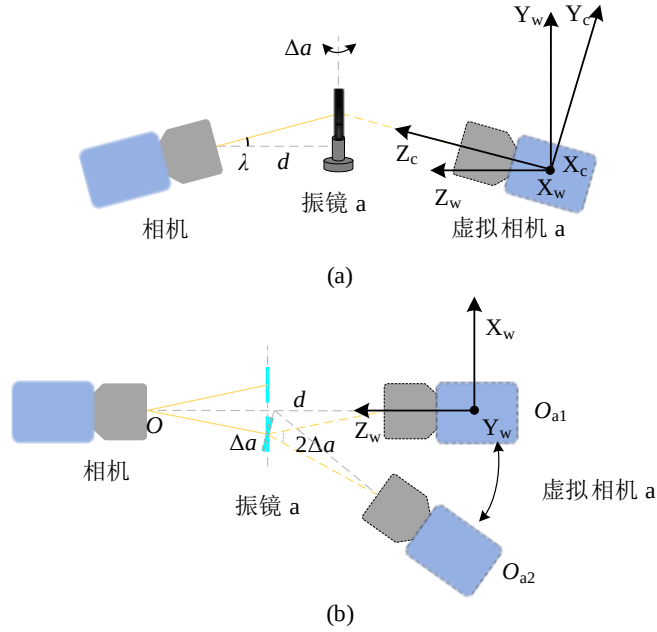


图 3-9 虚拟相机与振镜 a 的映射关系：(a)左视图，以振镜 a 与相机平时形成的虚拟相机中心为世界坐标系中心，X 轴平行于振镜 a，Y 轴垂直于水平面，Z 轴垂直于振镜 a；(b)俯视图，振镜 a 绕 Y 轴旋转 Δa ，虚拟相机旋转 $2\Delta a$ 。

随后将相机坐标系下的三维坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 转移到世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) 如公式(3-12)。

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & -\sin \lambda \\ 0 & \sin \lambda & \cos \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

在世界标系下的两个虚拟相机的外参可以通过双目标定的方式获得，基于上述两种方式得到振镜旋转后的虚拟相机之间的外参，可以计算得到当前振镜位置对应虚拟相机的相对外参矩阵。假设在世界坐标系中，通过双目标定的外参为 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ ，通过振镜 a 反射形成的图像在整体图像的右侧，所形成的虚拟相机主点为 $\mathbf{P}_a$ ，通过振镜 b 反射形成的图像在整体图像的左侧，所形成的虚拟相机主点为 $\mathbf{P}_b$ ，则振镜 b 形成的虚拟相机主点相对于振镜 a 形成的虚拟相机主点存在以下关系。

$$\mathbf{P}_b = \mathbf{R}\mathbf{P}_a + \mathbf{T} \quad (3-13)$$

结合振镜 a 旋转 Δa 的相对外参 $\mathbf{R}_a$ 、 $\mathbf{T}_a$ ，振镜 b 旋转 Δb 的相对外参 $\mathbf{R}_b$ 、 $\mathbf{T}_b$ 。最终可以获得振镜 a、b 发生旋转后，虚拟相机的外参 $\mathbf{R}'$ 、 $\mathbf{T}'$ 。

$$\begin{aligned}\mathbf{R}' &= \mathbf{R}_b \mathbf{R} \mathbf{R}_a^{-1} \\ \mathbf{T}' &= \mathbf{T}_b + \mathbf{R}_b \mathbf{T} - \mathbf{R}' \mathbf{T}_a\end{aligned}\quad (3-14)$$

从而可以计算出当前时刻的三维坐标，再通过坐标系迭代，将其统一到世界坐标系，从而进行相对位姿测量。

3.5 实验验证

本节对 3.3.2 提出的基于 VBC 的外参估计进行实验验证，实验道具选择一个大小适中的标定板，大小为 14mm×14mm，将 7×7 的圆形标定板固定在机械臂上，固定标定板的位置，分别通过改变两个振镜的旋转角度，拍摄不同振镜角度下固定标定板的图像，图 3-10 分别展示了一组仅改变振镜 a 和振镜 b 旋转角度的效果图。

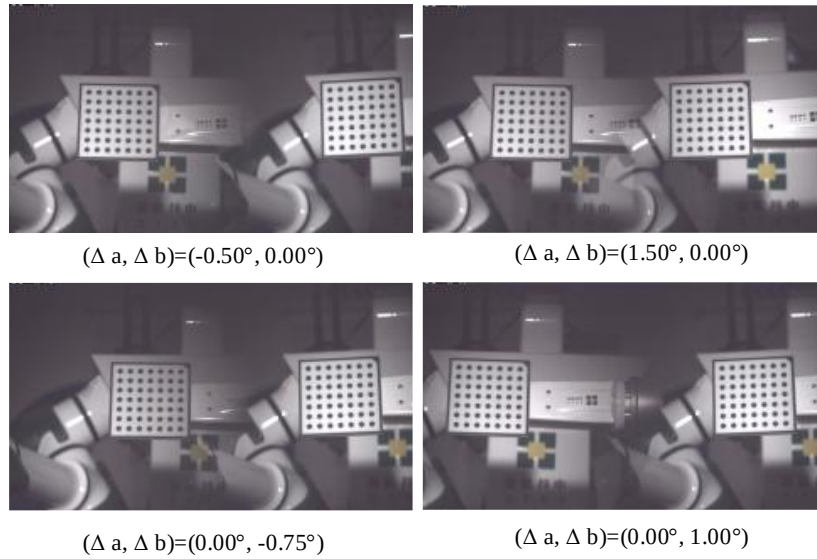


图 3-10 分别改变振镜 a、b 拍摄固定位置的标定板效果图

在图 3-10，上面两组图像为仅振镜 a 旋转，振镜 b 未发生旋转的效果图，由于振镜 a 在世界坐标系的左侧，通过成像原理，对应拍摄到的图像为图像的右侧。下面两组相反，下面两组图像为仅振镜 b 旋转，对应拍摄到的图像为图像的左侧。

由于成像距离的问题，其振镜的旋转角度有限，振镜每次绕 Y 轴旋转都不易太大，保证在振镜发生旋转前后，拍摄得到的第一张图像和最后一张图像都有完整清晰的标定板图像。基于旋转振镜 a 和 b，分别拍摄十张图像，以第一张图像对应的虚拟相机为标准，通过公式(3-11)，求得其他图像相对的虚拟相机与标准

位置的虚拟相机的外参。图像的右半部分对应振镜 a 拍摄的图像，用于推导振镜 a 的虚拟外参变化规律，同理左侧图像对应振镜 b 拍摄的图像用于推导振镜 b 的虚拟外参变化规律。在不同条件下分别进行三组实验，其中 X、Y、Z 是测量目标的相对位置，Roll、Pitch、Yaw 为测量目标的相对姿态角。

第一组图像的双振镜的起始位置为 $(\Delta a, \Delta b) = (-1.75^\circ, -1.00^\circ)$ ，振 a、b 分别绕中心逆时针旋转 0.26° ，理论上对应虚拟相机绕 y 轴旋转 0.52° 。实验数据如图 3-11，虚拟相机 a、b 位置变化呈现线性的变化规律，符合振镜角度改变的连续性。在角度变化中，虚拟相机 a 绕 Y 轴旋转的平均值为 0.496° ，在 Z 轴有个分角，其平均值为 -0.168° ，绕 X 轴的角度接近于零。相机 c 绕 Y 轴旋转的平均值为 0.488° ，绕 Z 轴旋转的平均值为 -0.176° ，绕 X 轴的角度接近于零。

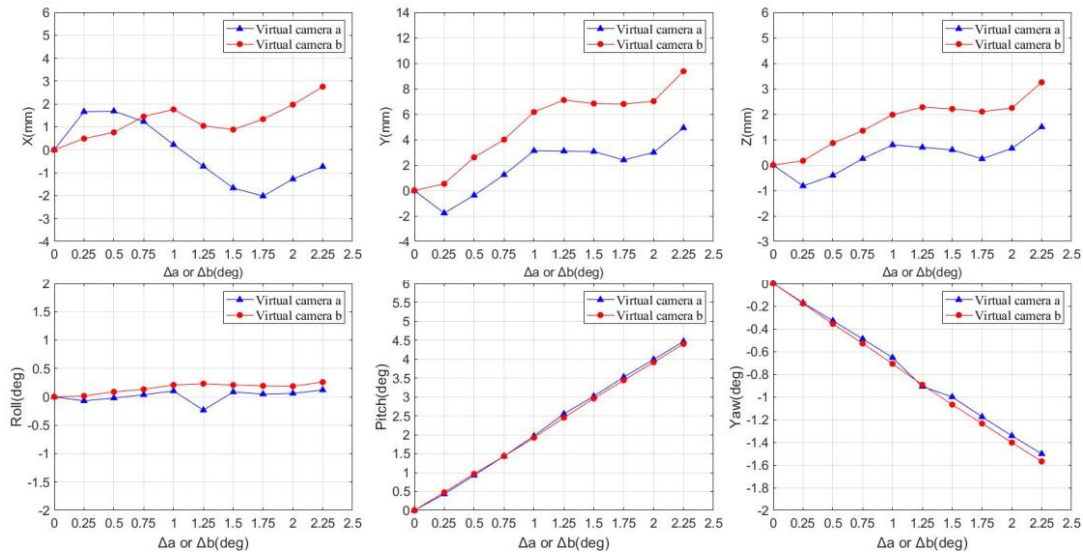


图 3-11 第一组振镜 a、b 旋转时虚拟相机相对位姿的对应图

第二组在不改变第一组双振镜摆放位置的条件下，图像的双振镜的起始位置为 $(\Delta a, \Delta b) = (-10.25^\circ, -10.00^\circ)$ ，振镜 a、b 分别绕中心逆时针旋转 0.25° ，理论上对应虚拟相机绕 y 轴旋转 0.50° 。实验数据如图 3-12，虚拟相机 a、b 位置变化呈现线性的变化规律，符合振镜角度改变的连续性。虚拟相机 a 绕 Y 轴旋转的平均值为 0.460° ，绕 Z 轴旋转的平均值为 -0.176° ，绕 X 轴的角度随着旋转角度的增大，有一定的累计，但整体变化较小，不超过 0.5° ，虚拟相机 b 绕 Y 轴旋转的平均值为 0.467° ，绕 Z 轴旋转的平均值为 -0.169° ，绕 X 轴的角度随着旋转角度的增大而增大。但整体来说，当前双振镜摆放位置向 X 轴的倾斜角度较小。

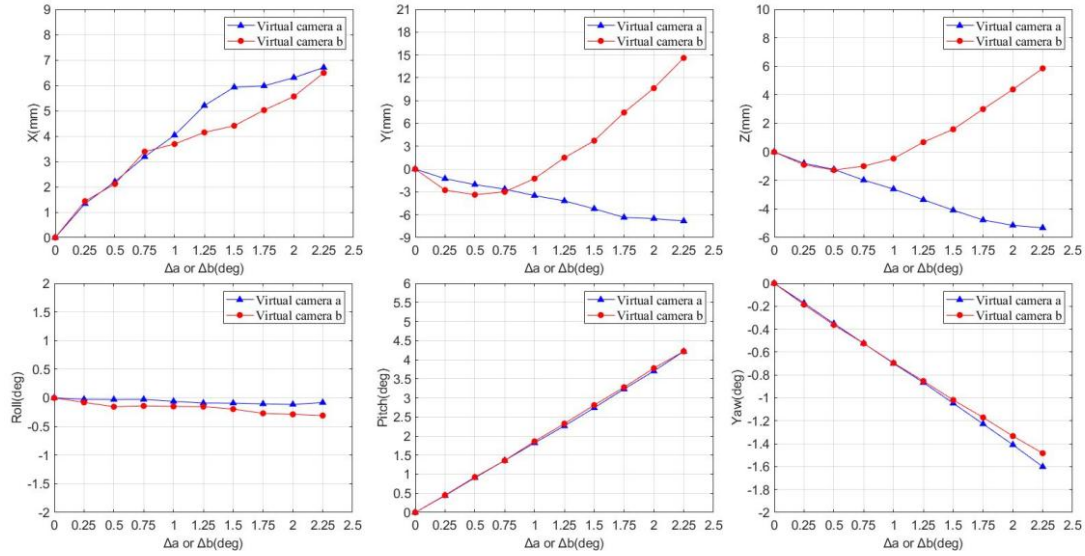


图 3-12 第二组振镜 a、b 旋转时虚拟相机相对位姿的对应图

第三组重新对双振镜的位置进行摆放，此时图像的双振镜的起始位置为 $(\Delta a, \Delta b) = (-1.75^\circ, -1.00^\circ)$ ，振镜 a、b 分别绕中心逆时针旋转 0.28° ，理论上对应虚拟相机绕 y 轴旋转 0.56° 。实验数据如图 3-13，由于改变摆放位置，其位置关系方程发生改变，但依旧符合连续性的规律。角度变化，虚拟相机 b 绕 Y 轴旋转的平均值为 0.541° ，绕 Z 轴旋转的平均值为 -0.182° ，虚拟相机 c 绕 Y 轴旋转的平均值为 0.520° ，绕 z 轴旋转的平均值为 -0.177° 。不难看出此次摆放位置的振镜 b 在 X 轴有个明显的偏角，振镜 a 在 X 轴的偏角较小。

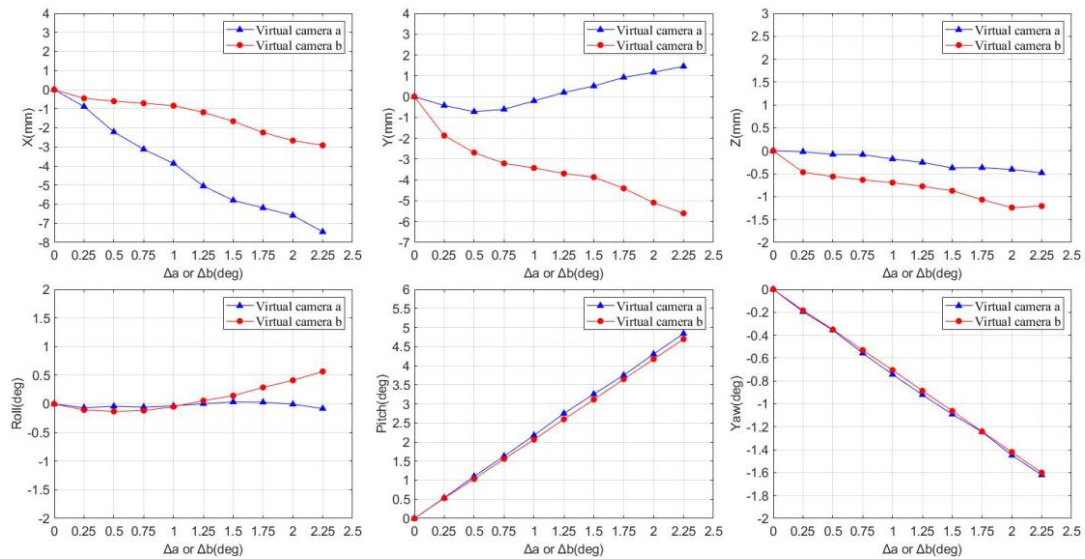


图 3-13 第三组振镜 a、b 旋转时虚拟相机相对位姿的对应图

尽管测量系统每次标定的内参有一定的区别,振镜的放置位置也在偏差,振镜旋转的初始位置也有一定区别。但并不难看出单组之间数据位置变换呈现一定的曲线变化。正如上文所说,由于实验设备的摆放位置和每次标定的内外参不一致,对应的位置变化方程是不一致的,其对 Y 轴的旋转角度与标准值有一定的差距,但可以通过曲线得到其斜率为趋于固定值,并且不难看出安装位置明显绕 Z 轴有个分角,而对 X 轴的分角较小,可证明 VBC 方法的精准性。其次,放振镜的摆放位置在每个坐标轴都有较大的倾斜角时,呈现出的位置变化曲线就越多变。

3.6 本章小结

本章节就高速运动时,振镜进行旋转跟踪,求得对应的虚拟相机之间的外部参数。在保证测量精度和优化结构参数的情况下,建立了世界坐标系,阐述了振镜旋转模型。振镜 a 每旋转 Δa ,对应的虚拟相机旋转了 $2\Delta a$,同理,振镜 b 每旋转 Δb ,对应的虚拟相机旋转了 $2\Delta b$ 。本章节就几何的方式和 VBC 的方式分别对单个振镜发生旋转时对应虚拟相机的移动矩阵进行分析和研究,求得当前虚拟相机与世界坐标系的虚拟相机之间的外部矩阵。同时结合世界坐标系时的标定的外参,可以得到当前虚拟相机之间的外部参数,从而后续可以采用三角测量的方式对测量目标进行三维位姿测量提供了条件。

第 4 章 高速运动目标的位姿测量方法

4.1 本章引言

在搭建完双振镜测量，振镜旋转模型的构建为运动测量做好前提准备，本章节就拍摄到的图像进行分析测量。不同于传统的单目测量，其本质通过双振镜形成两条虚拟光路，其原理更类似与双目测量。图像测量的第一步是将单幅图像分离开，进行滤波、目标分割等预处理。考虑到传统的位姿测量是以图像上测量目标的中轴线与边缘之间的交点，来计算三维坐标。但由于视差的因素，两幅图像中轴线与边缘的交点存在偏差，用于测量目标的三维位姿不是很准确。在初始位姿测量中，本节在中轴线的基础上，采取特征点提取测量目标的特征点，从而进行三维位姿测量。同时考虑到不是所有的图像都可以清晰的提取测量目标的边缘，同时为了简化后续测量步骤，相对位姿测量通过结合四图像特征点匹配与点云配准技术，确定测量目标当前位姿与初始位姿之间的相对位姿。将相对位姿与初始位姿相结合，即可得到测量目标的当前位姿。

4.2 测量原理

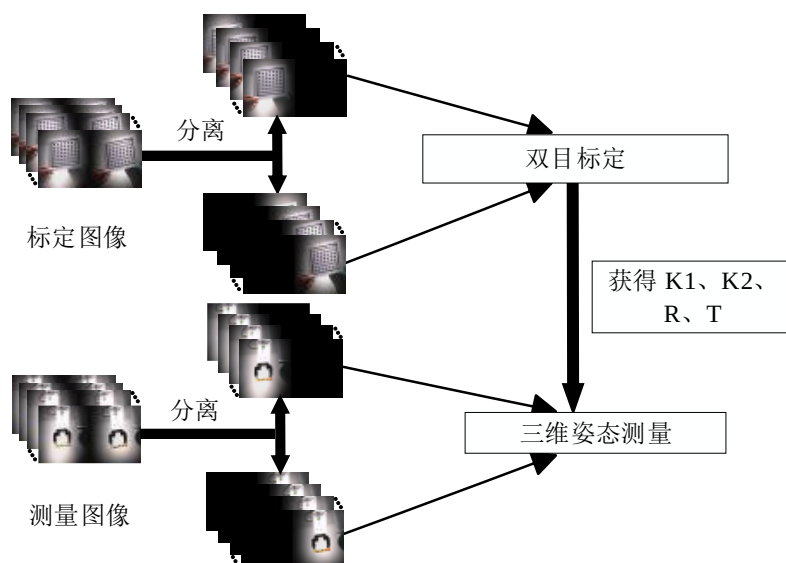


图 4-1 测量步骤

如图 4-1 所示，总测量步骤与双目类似，所以在测量前需要确定两个虚拟相

机的内参和外参，其次才能对需要测量的图像进行测量。其具体测量步骤如下：

第一步，双目标定。与常规的双目测量的区别是需要先将每张图像分离为左右两张，随后对分离的左右两组图像进行双目标定，通过棋盘格等标定图案，获取两个虚拟相机的内参和外参。

第二步，图像预处理。对拍摄到的图像进行左右分离，随后对左右两张图片去畸变、灰度化、噪声去除等预处理，从而提高后续的匹配效果。

第三步，特征匹配。对提取左右图像进行特征点匹配，寻找左右图像对应的匹配点。

第四步，三角测量。在完成相机内外参标定后，通过匹配到的特征点进行三角测量。

4.2.1 图像预处理

图像预处理是通过滤波等方法消除图像中的噪点并提升对比度，为后续的显著性目标测量和特征匹配奠定基础。常用的平滑滤波技术包括中值滤波、均值滤波和高斯滤波，它们主要用于去除噪声和减少图像细节。以下是这三种滤波方法的原理简介。

中值滤波原理：中值滤波是一种非线性滤波技术，其核心思想是通过计算窗口内像素的中值来替代中心像素的值。其原理可分为以下三个步骤。第一步，根据图像的大小和滤波的效果，选择一个大小适中的窗口，如 3×3 或 5×5 。第二步，在选择的窗口内，将其中的像素进行汇总，将其按大小顺序进行排序。第三步，在排序的像素中选择中间像素，将其赋值到窗口的中心值。最后按以上步骤将窗口遍历整张图像。

均值滤波原理：均值滤波是一种线性滤波方法，其原理是通过计算窗口内所有像素值的平均值来替换中心像素的值。其原理也是三个步骤。第一步，同中值滤波一样，选择一个如 3×3 或 5×5 大小适中的窗口。第二步，将窗口内的像素值进行汇总，从而求取该窗口的像素平均值。第三步，将求得平均值赋值于窗口中心像素。最后也是将窗口遍历整张图像。

高斯滤波原理：高斯滤波是一种基于加权平均的线性滤波方法，其核心思想是利用高斯函数计算权重，从而确定每个像素在平滑过程中的贡献程度。具体也

分三个步骤。第一步，选择一个大小适宜的窗口，并建立一个合适高斯函数，计算窗口内每个像素的权重，权重的算计根据其与中心像素的距离，越远的像素权重越小。第二步，根据上文的权重加权平均窗口内的像素值。第三步，将加权平均值赋给中心像素。

对实验中的原始图像分别进行中值滤波、均值滤波和高斯滤波处理，结果如图 4-2 所示。实验结果表明，中值滤波能够更好地突出测量目标的边缘信息，适合用于边缘提取，而均值滤波和高斯滤波的效果相对模糊，在边缘信息处理方面的表现弱于中值滤波。

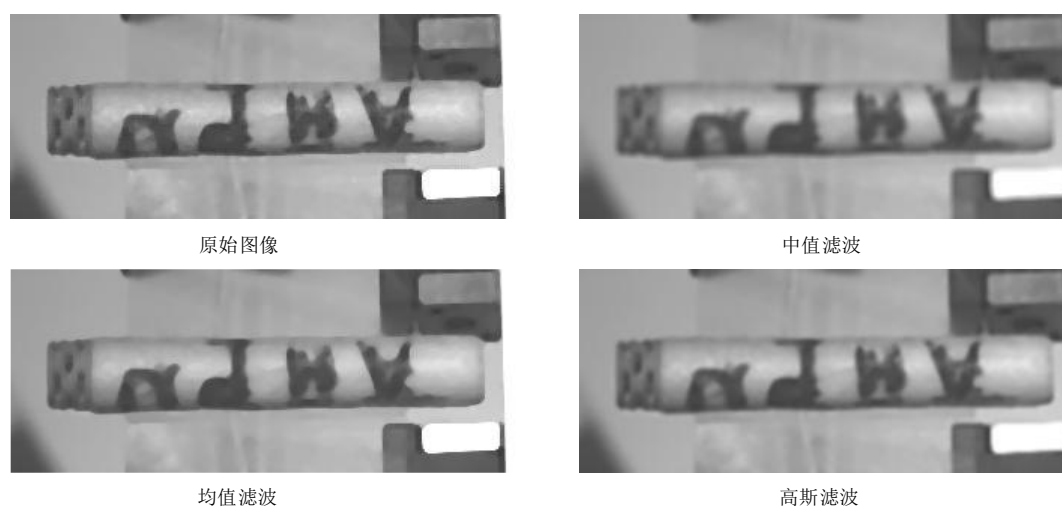


图 4-2 三种图像滤波的对比

4.2.2 Sift 特征点匹配

考虑到 Sift 算法具有尺度不变性、旋转不变性、光照不变性、一定的抗噪声能力等优点，适用于高速运动目标在运动时的旋转、微小形变等空间变化，本节就 Sift 算法和 Sift 特征点匹配的步骤进行介绍。

Sift 算法能够从图像中提取出具有尺度不变性的关键点，并对这些关键点进行描述，使得它们能够在不同的图像、不同的视角甚至不同的尺度下被准确匹配。Sift 算法主要步骤大致可分为四步，其目的是提取对变换鲁棒的特征点及其描述符，用于后续的特征点匹配。

第一步，尺度空间极值检测。通过构建高斯金字塔，搜索所有尺度上的图像位置，用高斯微分函数识别潜在的具有尺度和旋转不变性的兴趣点。

第二步，关键点精确定位。在每个候选位置上，通过拟合精细模型来确定位置和尺度，选择稳定的关键点。

第三步，方向分配。基于图像局部的梯度方向，给每个关键点分配一个或多个方向，使得后续的描述符具有旋转不变性。

第四步，描述子生成。在每个关键点周围的区域内，测量图像局部的梯度，将这些梯度转换成一种描述符，这种描述符对局部形状的变形和光照变化具有一定的不变性。

在提取了关键点并生成了描述符之后，就可以通过计算描述符之间的欧氏距离来进行关键点的匹配。通常使用 KD 树来加速匹配过程，通过找到最近邻和次近邻的关键点来确定匹配的可靠性。Sift 算法的优点在于其对图像的旋转、尺度缩放、亮度变化具有很好的不变性，能够在复杂的图像中提取出稳定的特征点。但是，Sift 算法的计算复杂度较高，对于实时性要求较高的应用场景可能不太适用。

4.2.3 显著性目标检测

为了获得更加精准的特征点匹配效果，测量位姿之前需要将测量目标与背景进行分离，而显著性目标检测算法的主要任务是识别并准确提取图像中最明显的物体区域，从而提取出显著性目标，适用于本文的需求。通过对图像中所有像素点的显著性进行评估和排序，生成一张显著性地图，其中像素点的值越高，表示其所在区域的显著性越高。该领域的研究通常分为两种形式：一种是只检测图像中最显著性的部分，另一种是在像素级别上进行精细分割，而本文主要研究后者。目前，显著性目标检测研究面临的主要挑战包括以下几个方面。目标尺度变化问题，大尺度目标通常能被深度特征图有效捕捉，而小尺度目标在图像下采样过程中容易被忽略，尤其是在浅层特征中，由于其语义信息较少，影响了网络的目标定位精度。当目标和背景的特征明显不同时，相似背景和复杂背景的干扰问题就能得到较好的检测。但在实际场景中，背景往往具有复杂的纹理，可能与目标特征相似，导致背景中的部分被误认为目标，严重降低了检测精度。针对边缘信息模糊的问题，现有的很多检测模型都只关注区域检测的准确性，对边缘细化的关注不够。边缘信息需要捕捉较小的感受野，而语义信息需要较大的感受野，这就

需要不同的网络通道来处理这两类信息的捕捉。通过深入研究这些问题，我们可以寻求改进的方法来提高显著性目标检测的性能。

基于深度学习的目标检测算法经历了多种网络架构的发展。早期的网络通常只关注于单一特征输出，主要依赖于网络的深层进行预测。尽管这种结构简化了模型的复杂性，但往往会导致目标的浅层特征丢失，从而使得预测目标区域模糊不清。为了解决这一问题，多层融合网络结构应运而生。通过融合不同尺度的特征，该方法能够提供更加详细的预测结果。随着注意力机制的普遍应用，该机制也逐渐被引入到显著性目标检测模型的特征提取部分。注意力机制通过对特征图中包含显著性信息的通道进行权重调整，增强了模型对目标信息和空间信息的关注度。在以上研究的基础上，本文采用一种新颖的显著性目标检测算法，该算法结合了多尺度特征融合和边缘注意力机制。该模型经过三个不同分支的特征提取，以获得注意力权重，并将两种不同尺度的图像进行加权融合，从而实现更丰富、更全面的特征表达。这种方法有效地融合了语义信息和尺度不一致的特征，进而提升了模型的性能与泛化能力。同时，通过引入边缘注意力机制模块，增强了网络对边界信息的关注，以提高目标检测中边缘完整性方面的表现。

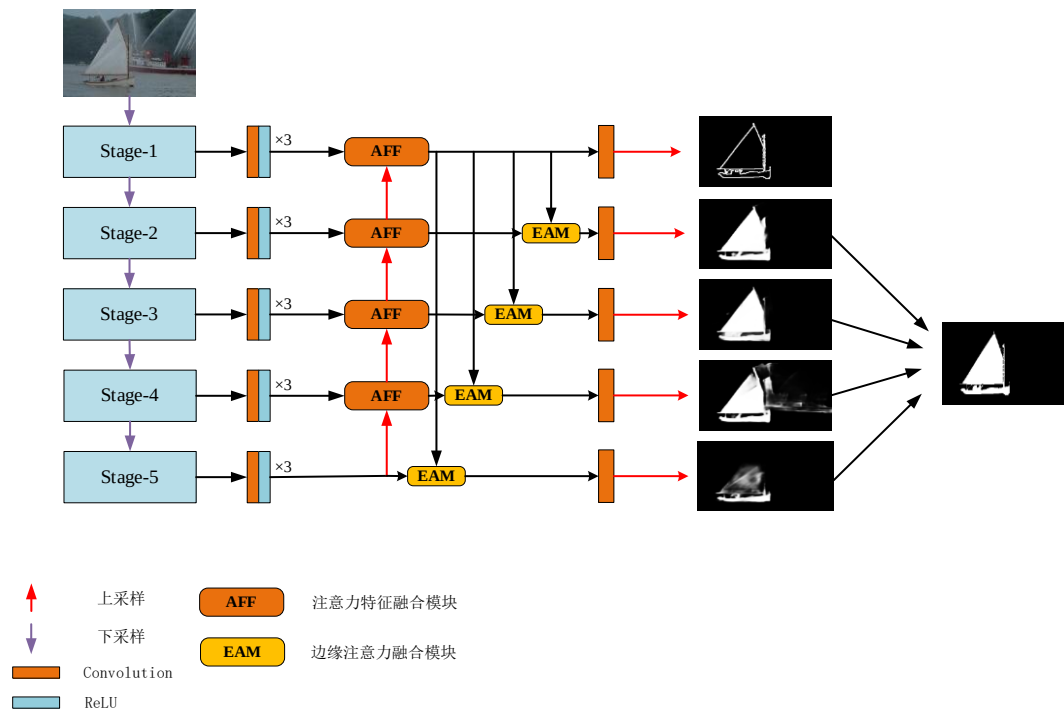


图 4-3 显著性目标检测网络框架

本文采用的显著性目标检测网络基于多尺度特征融合和边缘注意力机制，整体采用 U 型架构，主要分为三个模块：特征提取网络（使用 ResNet-50）^[78]、多尺度特征融合模块（包括 MS-MAM 和 AFF）^[79]、边缘注意力融合模块（EAM）^[80]。具体结构如图 4-3 所示。该网络采用经典的 U 型结构，通过结合编码器和解码器，有效整合了图像中的上下文信息。此设计不仅能同时保留局部与全局特征，还增强了模型对图像语义信息的理解。

通过上采样和跳转连接，网络可以整合多尺度特征，从而提高对不同尺度目标的精确分割能力，并提高模型对尺度变化的适应性。与传统的卷积神经网络相比，U 型编码器能在特征提取和压缩过程中更有效地保留细节。解码器逐渐恢复特征图的大小，减少了信息损失，更有利于保留图像的微小特征。因此，基于上述优点，整个网络采用了 U 型结构。

其网络的具体流程如下：通过 ResNet-50 骨干网络提取原始图像，产生五层不同尺度的特征。本文通过 3×3 卷积和 ReLU 激活来获得初始特征。为了更有效地整合这些特征，设计了一个多尺度特征融合模块（AFF），自下而上地整合五层特征。同时，为了更好地捕捉预测图像的边缘细节，引入了边缘关注机制模块，该模块主要用于增强目标边缘特征识别。由于高层特征图保留了更多的语义信息，本文将顶层融合特征视为边缘特征，并将其与融合后的重要目标特征输入边缘注意力机制模块，从而提高特征对目标边缘的灵敏度。将四个增强特征图进行通道和比例对齐，然后进行特征融合，最后上采样到原始图像大小，从而输出重要度预测结果。基于以上的显著性目标检测，将需要测量的图像进行分析处理，其具体效果如图 4-4 所示，可以看出显著性目标检测可以很好的提取本实验所用的测量目。

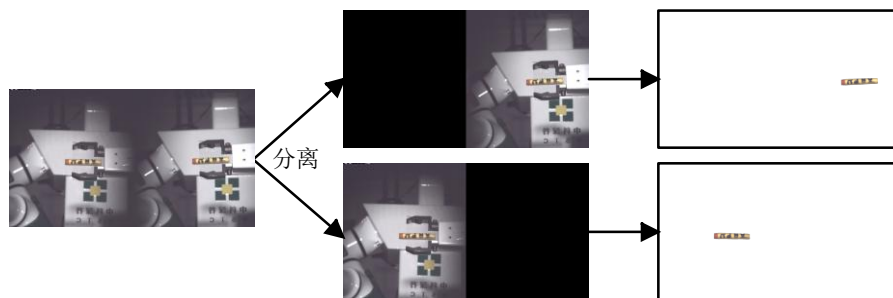


图 4-4 显著性检测效果图

4.3 初始位姿测量

三维位姿测量包含位置测量和姿态测量。针对传统中轴线测量存在视差的问题，本节将位姿测量分解为初始位姿测量和相对位置测量，初始位姿测量重在精度，相对位姿测量在保证精度的同时简化测量步骤。

初始位姿测量考虑到物体边缘模糊等问题，无法提取到精准的边缘角度，从而无法准确获得中轴线角度，因此通常需要以掩码的方式去提取物体的边缘，其测量步骤较为麻烦。故后续的相对位姿测量，可以通过四图像匹配的方式来计算当前图像的三维位姿，不需要用掩码的方式对每张物体图像进行边缘提取，简化了后续的测量步骤。初始位姿测量流程图如图 4-5 所示。

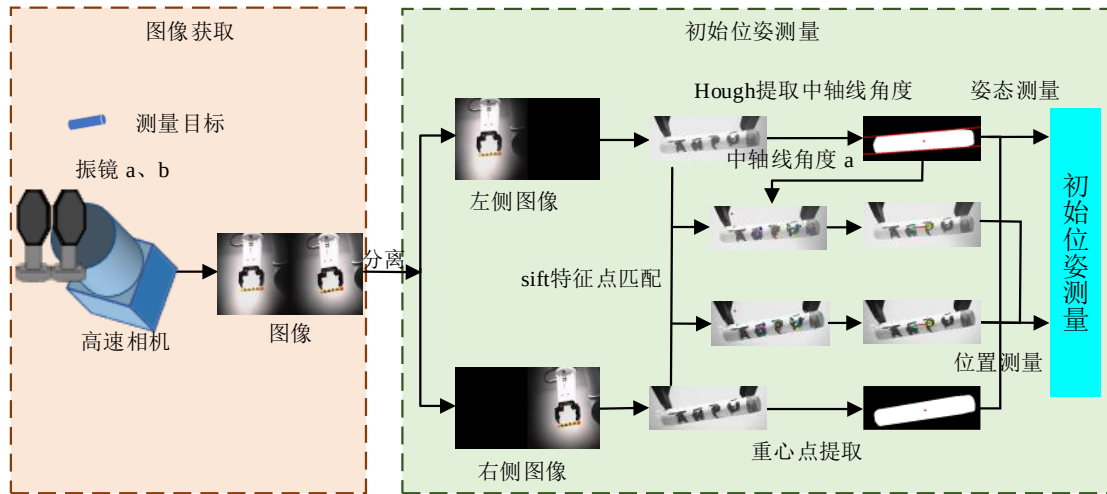


图 4-5 初始位姿测量流程图

4.3.1 初始位置测量

初始位置测量：如图 4-5 所示，由于获得的图像是双振镜形成的双视野图像，首先需要将获得的物体图像进行左右分离。通过对左侧图像的物体区域提取，并生成模板，通过模板匹配寻找右侧图像对应的物体区域。先计算物体的位置，首先对左右物体图像进行 Canny 边缘检测，分别提取左图像物体轮廓和右图像物体轮廓的质心。质心提取算法的具体实现步骤如下。

计算物体区域二阶以内原点矩 $m_{ij}(i, j < 2)$ 。

$$m_{ij} = \iint x_i y_j f(x, y) dx dy \quad (4-1)$$

其中 x_i 、 y_j 为像素坐标系，测量目标拥有的像素点。考虑到测量目标在中轴线呈现对称分布，因为可以假设各像素点的加权值一样，故 $f(x,y)=1$ ，不影响中轴线的计算结果。物体轮廓质心为：

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (4-2)$$

在得到测量目标的质心点，随后通过三角测量的方法计算物体在相机坐标系下的位置信息。

4.3.2 初始姿态测量

初始位姿测量：如图 4-5 所示，首先通过 Hough 直线提取图像中测量目标轮廓上的最长的上下两条边缘线，并计算两条直线对应的倾斜角 a_0 和 a_1 ，然后通过平均值的方法计算物体中轴线的角度 a ，对应的公式如下：

$$a = \frac{a_0 + a_1}{2} \quad (4-3)$$

随后将左右两张物体图像进行特征点匹配，可得到相匹配的 $n(n > 2)$ 组特征点。假设左图像匹配到的特征点集为 point_1 ，右图像匹配到的特征点集为 point_2 。对 point_1 点集中的任意两点像素坐标，求两点的像素坐标角度，并计算与中轴线的角度差，提取最小角度差对应的像素坐标 (x_1, y_1) ，并找到对应右侧图像坐标 (x_2, y_2) ，其对应的公式如下：

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2) = \min(\text{abs}(\arctan(\frac{y_i - y_j}{x_i - x_j}) - a)), 1 \leq i, j \leq n \quad (4-4)$$

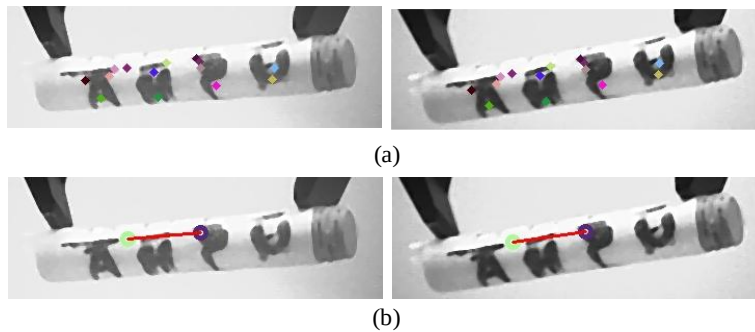


图 4-6 匹配到的效果图：(a)左右图像匹配到的特征点；(b)左右图像中找到的一组与中轴线斜率最小的特征点。

如图 4-6 所示，上下分别展示 Sift 特征点匹配到的特征点和找到的一组与中

轴线斜率最接近的一组像素点，其中相同颜色的为一组特征点。

在得到像素坐标系中与中轴线 a 夹角最小的一组特征点后，将这组特征点当作中轴线上的两点，并进行三角测量得到世界坐标系下两个三维坐标 (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) ，根据图像判断两个像素坐标的在图像中所处的前后位置，最后通过这两个三维坐标计算物体的位姿。其中， ϕ_r 为绕X轴的滚转角， ϕ_p 为绕Y轴的俯仰角， ϕ_y 为绕Z轴的偏航角，姿态计算公式如下：

$$\begin{cases} \phi_r = \tan^{-1}\left(\frac{Y_2 - Y_1}{Z_2 - Z_1}\right) \\ \phi_p = \tan^{-1}\left(\frac{Z_2 - Z_1}{X_2 - X_1}\right) \\ \phi_y = \tan^{-1}\left(\frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1}\right) \end{cases} \quad (4-5)$$

4.4 运动目标位姿测量

为了简化后期对物体的三维位置和姿态测量。运动目标的测量分为相对位姿测量和坐标系迭代。相对位姿测量是当前位姿相对于初始位姿之间的位姿变换，从而不需要单独分为位置测量和姿态测量，运动目标是随着虚拟坐标系变化，测量的位姿需要统一坐标系。同时，通过相对位姿测量，从而简化初始姿态测量中的边缘提取和质心点查找，避免了边缘不齐的问题。相对位姿测量具体流程图程图 4-7 所示。

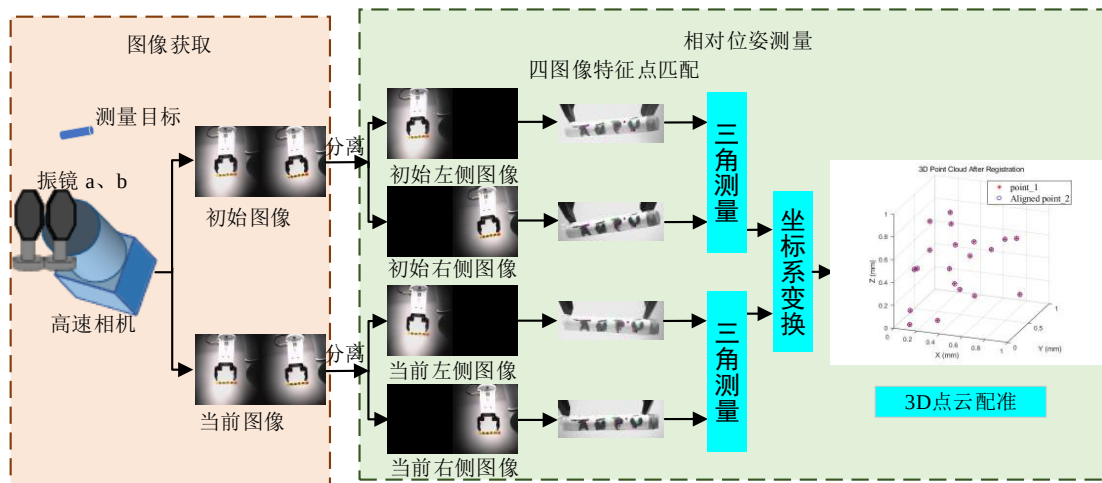


图 4-7 相对位姿测量流程图

4.4.1 相对位姿测量

相对位姿测量通过初始图像和当前图像的左右四张图像进行特征点匹配,从而获得当前位置测量对初始位置测量目标相同的特征点。通常的 Sift 特征点是在两张图像之间进行匹配,四图像特征点匹配在此基础上进一步进行匹配。

四图像特征点匹配具体步骤如下:将第一幅图像与第二幅图像进行匹配,第二幅图像与第三幅图像进行匹配,第三幅图像与第四幅图像进行匹配,从而得到三组特征描述子,随后由于第一组特征描述子和第三组描述子是各不相同的两幅图像组成了,而第二组特征描述子的两种组成图像与第一组和第三组特征描述子组成图像都有重叠部分,以第二组描述子为条件,筛选第一组特征描述子和第三组描述子与之相同的,从而获得四幅图像相同的特征点,其具体效果如图 4-8 所示,相同颜色的特征点为一组。

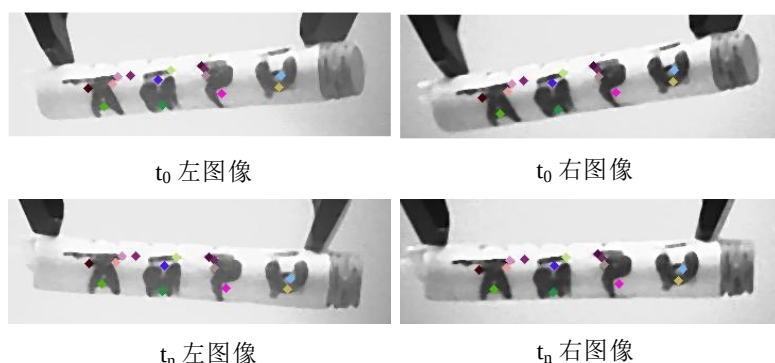


图 4-8 四图像匹配结果图

从而通过初始图像中匹配到的特征点求得初始位置测量目标三维点云,通过当前图像中匹配到的特征点求得当前位置测量目标的点云,最后通过点云配准求得测量目标的三维位姿相对于初始位姿的位置和位姿。

4.4.2 坐标系迭代

在相对位姿测量中可分为两种情况。一是双振镜不发生旋转,保持静止情况,相对位姿和初始位姿处于同一世界坐标系,在这种情况下,四图像匹配后求得的两组 3D 点云可以直接进行点云配准,求得相对位姿。二是双振镜跟随目标发生旋转,以初始位姿为世界坐标系,随着振镜旋转,四图像匹配后,当前位置求得 3D 点云与初始位姿求得的 3D 点云不在同一坐标系,故需要在点云配准前需要进行坐标系迭代。

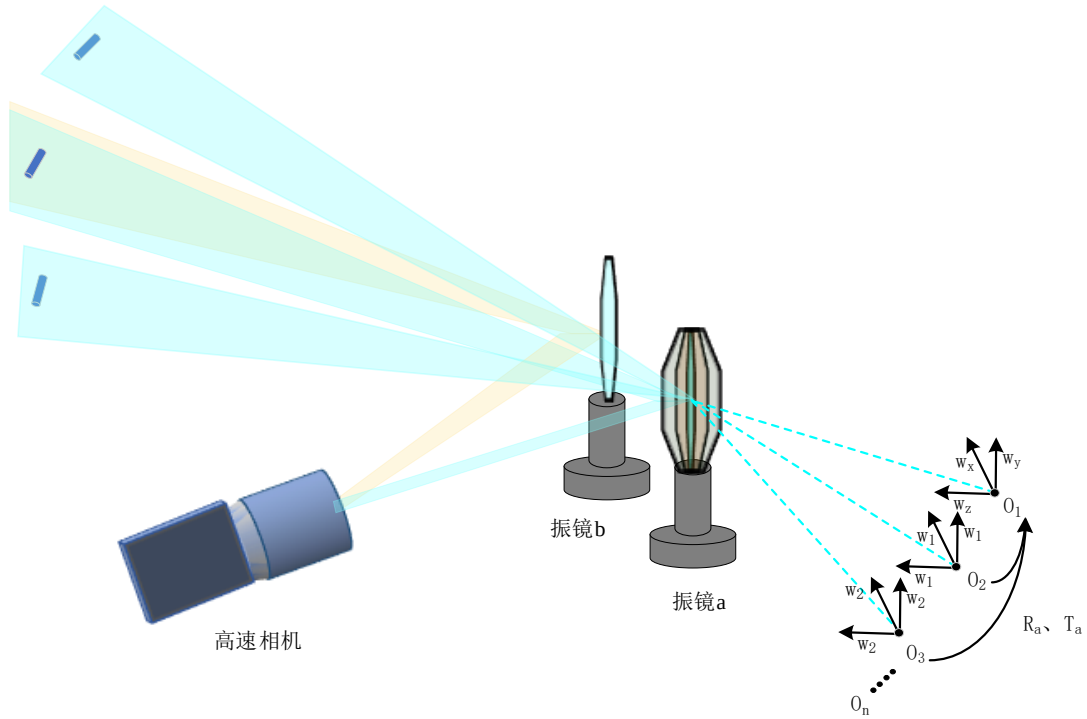


图 4-9 坐标系迭代

如图 4-9 所示，以振镜 a 形成的虚拟相机坐标系来计算三维坐标，当前位姿的 3D 点云为 $\mathbf{P}_0$ ，对应的振镜当前角度虚拟相机位置与振镜初始角度虚拟相机位置变换矩阵为 $\mathbf{R}_a$ 、 $\mathbf{T}_a$ ，通过坐标系迭代可将点云 $\mathbf{P}_0$ 转移到世界坐标系 $\mathbf{P}_1$ ，随后才可以进行点云配准。

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{R}_a \mathbf{P}_0 + \mathbf{T}_a \quad (4-6)$$

4.5 本章小结

本章主要是图像的位姿测量算法进行了分析和研究，基于单相机加双振镜的测量模型，对目标进行位姿测量研究。本章首先探讨了基于双振镜系统的测量流程，随后对图像预处理、Sift 特征点匹配及显著性目标检测的原理阐述。其次对目标的位姿测量进行研究，本文将位姿测量分为初始位姿测量和相对位姿测量。初始位姿测量重在精度，采用 Hough 直线提取、Sift 特征点匹配、加权重心法相结合。相对位姿测量在保证精度的同时简化测量步骤，采用四图像特征点匹配与点云配准的方法进行测量。最后就振镜旋转进行坐标系迭代分析。本章节就本文的测量算法进行了研究，为后续章节测量提供理论支持。

第 5 章 实验及结果分析

5.1 本章引言

在前面章节中，介绍了双振镜测量系统的结构和原理，随后对振镜旋转模型进行了分析和研究，最后就图像测量算法进行了研究。本章就前面的双振镜旋转模型理论研究、图像测量算法进行实验验证和误差分析。首先搭建单相机加双振镜的实物实验平台，以及高速运动目标发射平台。随后以高精度的机械臂和高精度的陀螺仪为基准，通过静止实验对测量算法及振镜旋转模型进行验证，证明其理论推导和测量算法的精度，随后通过动态模拟实验验证该系统对运动目标测量的可行性和精度，最后用于高速运动目标的测量。

5.2 实验平台搭建

如图 5-1 所示，以第二章设计的测量系统进行实物平台的搭建，拍摄系统由高速相机（千眼狼 M220）、双振镜系统（天传奇 SC50 的 Y 轴）、振镜控制模型、嵌入式控制系统（STM32F103）、对射型光纤传感器、光源以及挡光板等。其中由于光线是通过振镜反射进入相机的，对光照有一定的要求，所以需要增加光源来调节光照强度。其次两个振镜的大小并不能全部占据相机拍摄到的画面，通过增加挡光板避免相机拍摄到场景其它物体，增加图像可利用率，降低测量难度。

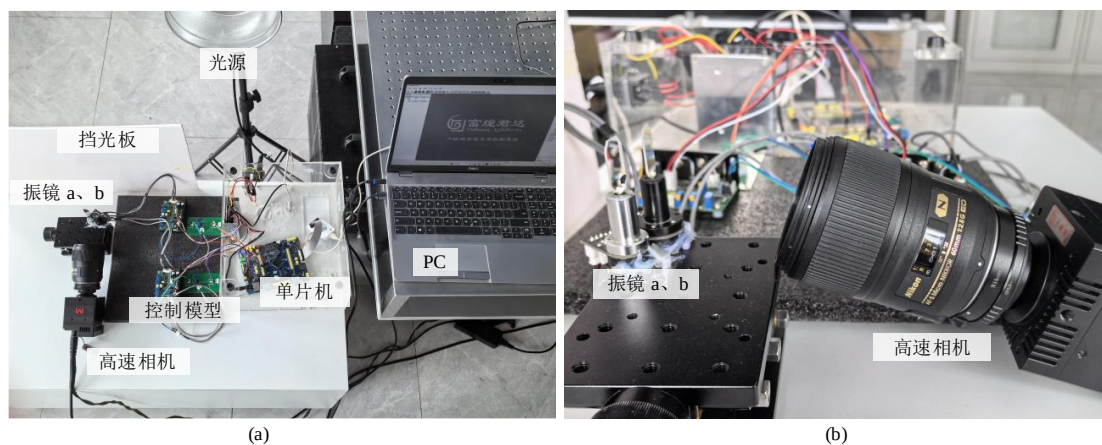


图 5-1 实验场景图：(a)俯视图，挡光板使相机成像系统更清晰；(b)侧视图，相机的放置位置要与水平面呈一定的夹角。

振镜是测量系统中的关键组成部分，其响应速度、定位精度和最大偏转角等参数直接影响运动追踪的准确性和视场范围。经过对比，两个振镜都选择了天传奇公司的 SC50 激光扫描振镜的 Y 轴，其具体性能参数能满足实验要求，具体性能如表 5-1 所示。

表 5-1 振镜主要参数

参数名称	参数规格
电源电压	$\pm 24\text{V}/1\text{A}$
位置电压比例系数	$0.5\text{V}/^\circ$
模拟位置电压输入范围	$\pm 10\text{V}$
1%阶跃响应时间	0.12ms
尺寸大小	$14\times 24\text{mm}$
最大扫描角度	$\pm 20^\circ$
扫描速度	50Kpps
工作温度	$0\text{-}50^\circ\text{C}$

根据表 5-1 描述，该振镜具有快速响应速度（仅 0.12ms ）和较大的扫描角度（最大覆盖范围 40° ），这使得它能够满足测量系统对视线和凝视范围的设计需求。通过虚拟相机角度变化范围是振镜角度变化范围的二倍，相机的视线可达到近 80° ，与振镜的反射性相结合，有助于大范围跟踪运动目标。

为了记录图像，本实验选择了千眼狼 M220 高速相机，其全画幅分辨率为 1920×1080 ，在此分辨率下的帧率高达 2000FPS ，也就是 1 秒可拍摄 2000 张图像。这一性能使得相机能够在振镜减少目标与相机之间相对位移的情况下，依然保持良好的成像能力。此外，该相机的工作温度范围为 -20°C 至 60°C ，符合拍摄和后续测量的需求。关于振镜的控制方式，采用电压信号来控制振镜的角度变化。系统中使用 DAC（数字/模拟转换器）进行电压输出，控制模块则选用 STM32F103 芯片。该芯片具有 512KB Flash 存储器、4 个通用定时器、2 个基本定时器和 3 个 12 位 ADC，主要用于接收测速系统测量信号的测速结果，测量信号用于检测子弹离开发射装置，测速结果用于计算振镜应到达的目标位置，并输出相应的数字量，最终通过 DAC 模块转换为电压，对振镜进行精准控制。测速模块及触发装置则采用博亿精科的对射型光纤传感器 YIBO-NA11，确保系统在测速过程中的准确性和可靠性。通过这些硬件的组合，能够有效地实现高效、稳定的测量系统，

主要参数表 5-2 所示。

表 5-2 光纤传感器参数表

参数名称	参数规格
输出方式	NPN 常开型
工作电压	DC12-24V
响应时间	$\leq 200\mu s$
检测区域	0.3-120mm
检测物体	非透明物体

在工业领域，激光对射开关通常作为触发传感器，但针对实验中高速、体积小的飞行目标，其通过传感器的时间通常小于 2 毫秒，而传统的激光对射开关响应时间约为 2.5 毫秒，存在响应速度慢的问题。为此，本文选用了响应时间仅为 200 微秒的对射型光纤传感器，其不仅响应快速且检测区域覆盖范围大，这使它能够满足检测较小的模拟发射物的需求。实验方案：当目标经过第一个传感器时，控制板开始计时；当目标经过第二个测速装置时，计时结束。根据两个传感器之间的距离，能够计算出目标的飞行速度。此外，当目标经过第三个光纤传感器时，振镜会按照预定的控制曲线开始旋转，从而使相机的视线始终跟踪目标，确保目标始终处于视场中央。为了支持高速飞行目标的拍摄和测量实验，在实验室搭建了一个模拟发射装置，用于发射橡胶子弹，最大发射速度可达 40 米/秒。具体设计模型如图 5-2 所示。

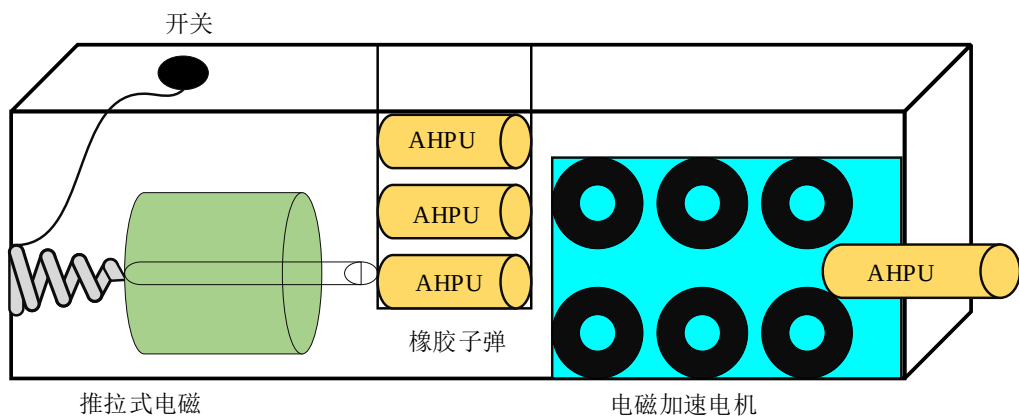


图 5-2 高速目标模拟发射装置示意图

该发射装置的基本工作原理是利用尾部的推拉式电磁铁将子弹推进至由电机驱动的转轮加速部分进行加速，从而使目标获得较大的初速度，最终通过发射

管发射出去。电机的转速是可调的，这使得我们能够通过调节电机的速度来改变目标的发射速度，从而测试系统对不同速度目标的跟踪效果。图 5-3 展示了模拟发射装置的实物图。

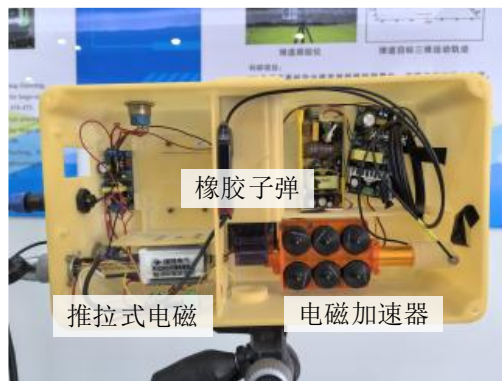


图 5-3 模拟发射装置实物图

5.3 测量方法精度验证实验

5.3.1 相对位置测量精度验证

位置相对测量是在双振镜处于静止，不发生旋转的情况下，对目标的位置移动精度进行测量。其测量方法是相对位姿测量，以首张图像为初始图像，采用方法的点云配准来获得相对位置。相对于将三维坐标转移到世界坐标系进行验证，本小节相对位姿测量采用相对于第一张图像的位姿进行测量，故以第一张图像的相机坐标系为基础。同时，第一张图像的相机坐标系与机械臂的坐标并不平行，故可以通过标定的方式得到相机坐标系与机械臂坐标系的姿态矩阵，将第一张图像对应的相机坐标系通过姿态矩阵旋转到一个与机械臂平行的坐标系，以此刻的坐标系为世界坐标系，从而可以通过机械臂的位姿变换进行测量算法的精度验证。

首先第一步将双振镜旋转到一个合适的视野，使两个振镜的重叠视野尽可能的多，从而有更大的可测量范围。随后对双振镜这一旋转角度下的虚拟相机进行内外参的标定，随后就可以对该区域拍摄的目标图像进行测量。在经过图像预处理和显著性目标检测后，将初始位置与相对位置左右分离的四幅图像进行特征点匹配，如图 5-4 所示，初始位置和当前位置的左右四张图进行四图像特征点匹配效果图，其中相同颜色的特征点为一组。

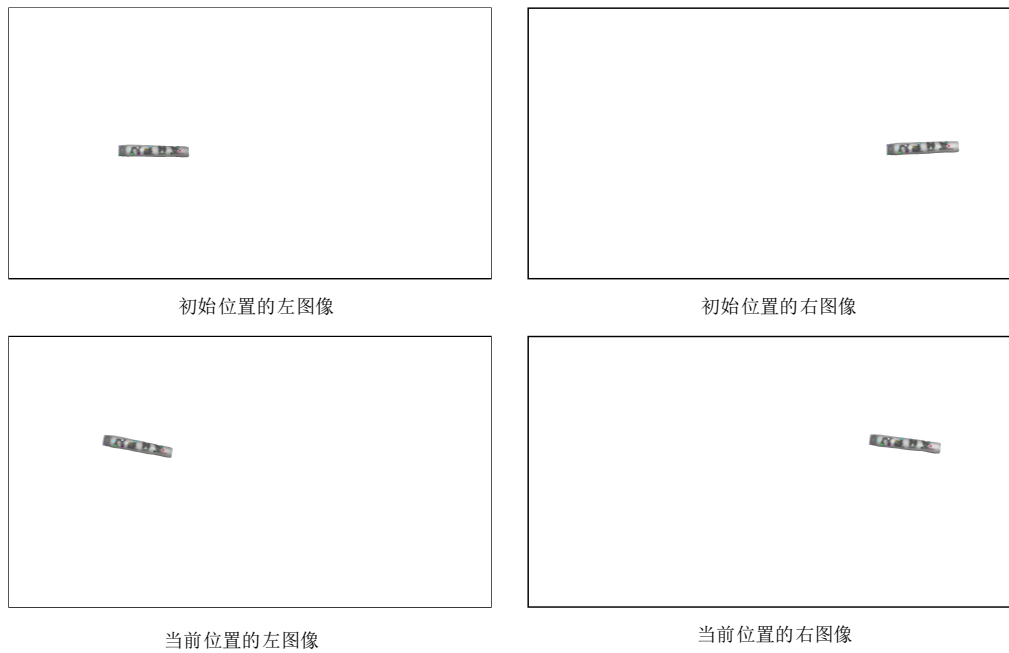


图 5-4 四图像 Sift 特征点匹配

随后将匹配到的当前位置特征点和相对位置特征点进行三角测量，从而得到同一坐标系下的两组三维点云。将两组三维点云的坐标系通过上述的姿态矩阵转移与机械臂平行的坐标下进行精度验证，最终得到该坐标系系下初始位置和相对位置的两组点云，如图 5-5 所示。

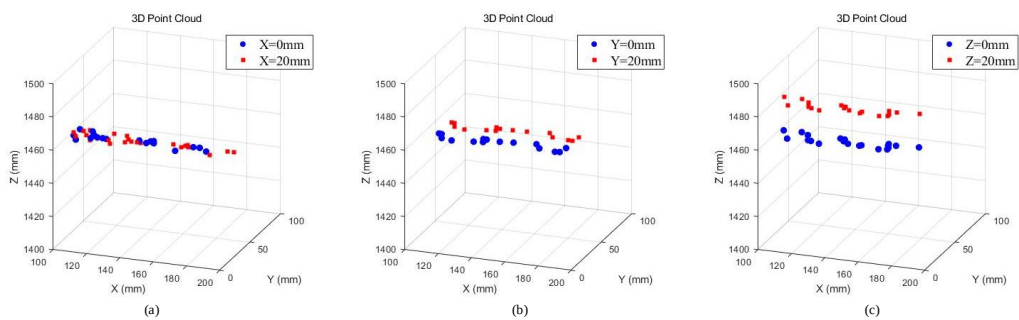


图 5-5 x 轴、y 轴、z 轴位置移动 20mm 的 3d 点云图

考虑到每次四图像正特点匹配到的数量和位置都有一定区别，在图 5-5 中，选用了初始位置 0mm 和相对位置 20mm 进行展示 3d 点云图，其中蓝色圆形为初始位置，红色方形为相对位置，(a)展示了黄色橡胶子弹在 X 轴的位置移动，(b)展示了黄色橡胶子弹在 Y 轴的位置移动，(c)展示了黄色橡胶子弹在 Z 轴的位置移动。在得到两组三维点云后，进行点云配准就可以进行测量。

具体实验的相对位置测量是通过对机械臂位姿的移动为准值,计算绝对误差和相对误差,机械臂的运动精度为 0.01mm。在实验中,将黄色橡胶弹放置于机械臂的夹爪,在振镜的角度保持不变的情况下,仅通过移动机械臂来验证相对位姿测量算法的精度。该系统可以通过标定得到初始位置虚拟相机 b 相对于机械臂的位姿为 $(-20.93^{\circ}, -5.77^{\circ}, 2.18^{\circ})$,也就是此时虚拟相机 b 的仰角为 20.93° ,随后将得到的三维姿态转移到世界坐标系。每次移动 10mm,正负方向各移动两次,其标准值为-20mm, -10mm, 10mm, 20mm。相对位置测量结果如表 5-3 所示。

表 5-3 相对位置测量

标准值 (mm)	X(mm)	绝对 误差 (mm)	相对 误差 (%)	Y(mm)	绝对 误差 (mm)	相对 误差 (%)	Z(mm)	绝对 误差 (mm)	相对 误差 (%)
-20	-20.49	-0.49	2.45	-20.14	-0.14	0.71	-20.85	-0.85	4.25
-10	-10.03	-0.03	0.31	-10.08	-0.08	0.76	-10.57	-0.57	5.73
10	10.08	0.08	0.83	10.04	0.04	0.36	10.25	0.25	2.45
20	20.35	0.35	1.75	20.05	0.05	0.23	20.75	0.75	3.73

在表 5-3 中,可得到位置的平均相对误差为 1.96%。在机械臂对比实验中,其中在空间上水平方向 X 轴和竖直方向 Y 轴测量精度差距不大,在空间中的深度 Z 轴测量精度相对误差相对较大,其中深度误差与相机标定精度有着较大的影响。同时单相机加双振镜本身的测量系统误差受虚拟相机基线长度的影响,由于采用的是单相机加双振镜这种测量模式,双振镜摆放位置不可能太远,否则就会脱离拍摄视野,尽管双振镜可以发生旋转来改变基线长度,但总体虚拟相机的基线变化不大,从而对该系统的测量精度产生了影响。同时相机标定精度、匹配点匹配的效果也在一定程度影响该系统的测量精度。

5.3.2 相对姿态测量精度验证

与相对位置测量方法一致,将测量目标放置于机械臂,以标定时位姿为标准,每次移动 10° ,正负方向各移动两次,其标准值为 -20° , -10° , 10° , 20° 。虽然测量方法与位置测量一致,在将黄色橡胶弹固定在机械臂上,机械臂的姿态改变是以夹爪中心的坐标系为中心的,而实际上很难将测量目标的中心放置于夹爪中心的坐标系,得到的三维点云会有一定的偏差。但总体来说,本小节测量的是相对姿态,故测量目标是否在机械臂夹爪的中心对实验验证影响不大。图 5-6 分

别展示测量目标 x 轴、y 轴、z 轴机械臂姿态移动 20° 的 3d 点云图。

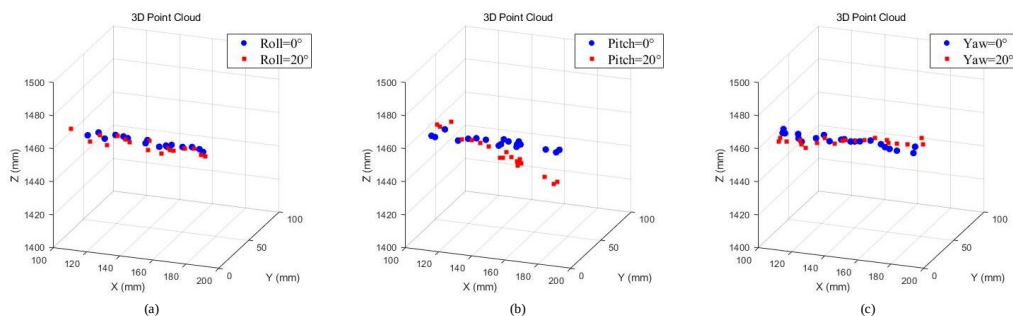


图 5-6 x 轴、y 轴、z 轴姿态移动 20° 的 3d 点云图

同位置测量的三维点云图所在的世界坐标系，在图 5-6 中，选用了初始姿态为 0° 和相对姿态为 20° 进行展示 3d 点云图，其中蓝色圆形为初始位置，红色方形为相对位置，(a)展示了黄色橡胶子弹绕 X 轴的旋转的滚转角 Roll，(b)展示了黄色橡胶子弹绕 Y 轴旋转的俯仰角 Pitch，(c)展示了黄色橡胶子弹绕 Z 轴旋转的偏航角 Yaw。相对位姿测量结果如表 5-4 所示。

表 5-4 相对姿态测量

标准值 ($^\circ$)	$\phi_r(^\circ)$	绝对 误差 ($^\circ$)	相对 误差 (%)	$\phi_p(^\circ)$	绝对 误差 ($^\circ$)	相对 误差 (%)	$\phi_y(^\circ)$	绝对 误差 ($^\circ$)	相对 误差 (%)
-20	-20.83	-0.83	4.14	-20.86	-0.86	4.31	-20.36	-0.36	1.78
-10	-10.44	-0.44	4.36	-10.06	-0.06	0.59	-10.24	-0.24	2.35
10	10.52	0.52	5.24	10.41	0.41	4.13	10.23	0.23	2.31
20	20.81	0.81	4.03	20.80	0.80	4.01	20.45	0.45	2.27

在表 5-4 中，可计算得到姿态平均相对误差为 3.29%。相对于位置测量，其姿态测量于四图像特征点匹配的精度有关，在特征点匹配数量相差不大的情况下，其点云匹配的精度也相差不大，故对于位姿测量的误差受初始位置标定精度有关，就标定板放置于机械臂夹爪的垂直度，由于标定板的倾斜，对姿态测量的精度影响相对较大。

5.4 高速运动目标测量实验

5.4.1 标定和初始位姿测量

首先通过张氏标定得到此时虚拟相机的内参和外参。首先通过对 7×7 圆形

标定板进行拍摄 30 张图像，随后进行左右分离，通过 python 进行标定。左侧虚拟相机的平均重投影误差在 0.193 像素，右侧虚拟相机的平均重投影误差在 0.184 像素。

表 5-5 左侧相机和右侧相机的虚拟相机内参

	f_x	f_y	u_0	v_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
左虚拟相机	5998.28	6035.05	1002.63	621.20	0.76	31.79	-660.11	-0.01	-0.02
右虚拟相机	5837.75	5869.40	1053.71	700.36	0.33	-15.55	240.38	0.00	0.04

通过对表 5-5 虚拟相机的内参进行分析，由于是单个相机，理论相机内参是一样的，但由于添加的振镜和标定精度存在一些差异，在一定程度上影响了相机的内参。以下是两个虚拟相机的外参。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9811 & 0.0788 & 0.1765 \\ -0.0766 & 0.9969 & -0.0195 \\ -0.1775 & 0.0056 & 0.9841 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} -20.3576 \\ 1.6362 \\ -3.5787 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

理论当两个振镜完全平行，且只存有 y 轴的旋转角度。两个振镜所形成的虚拟相机平移矩阵 y 轴的外参为零。实际由于两个振镜的工艺并不完全一样，且与相机之间的摆放位置存在一定偏差，故实际实验在 y 轴上存有一定的偏差。

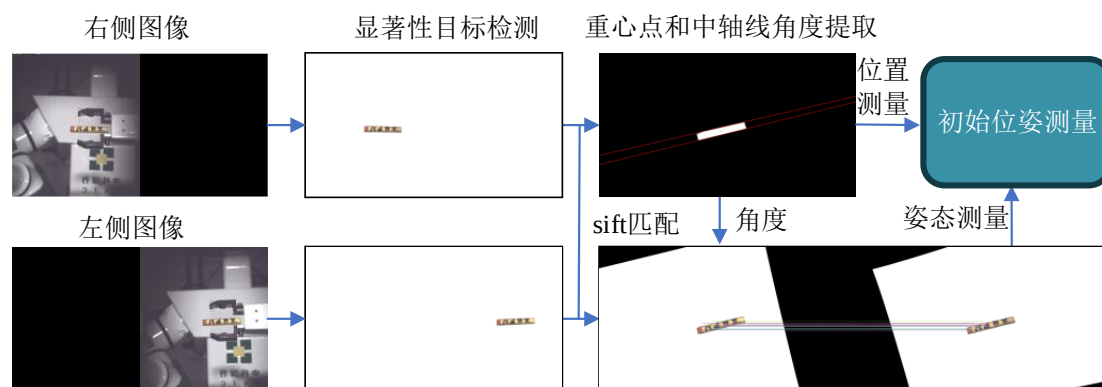


图 5-7 模拟发射装置实物图

初始位姿测量：依据 4.3 的初始位姿测量步骤。如图 5-7 所示，本实验选用黄色橡胶弹，在上面加上黑色纹理 AHPU 为测量物体。将初始图像进行左右分离，通过显著性目标检测来提取橡胶弹，再通过校正后，通过霍夫直线提取最长的两条直线，上侧直线的角度为 13.80° ，下侧直线的角度为 13.01° ，从而求平均角度为 13.41° ，也就是中轴线的斜率，通过特征点查找，可得到最小的一组像素

点所形成的夹角与平均角度所差 0.016° 。

也可以通过这个角度差判断其初始位置的姿态精度,同时对于非规则的测量物体,也可以通过对初始图像对测量物体姿态角度进行选择,从而可以得到后续的姿态变换。其中找到与中轴线斜率最接近的一组特征点如图 5-8 所示。



图 5-8 模拟发射装置实物图

随后将加权中心点和这组与中轴线斜率最接近的特征点,结合双目标定的内参矩阵和外参矩阵,计算其在空间中的三维坐标。在得到三维坐标后,姿态测量可通过公式(4-5)计算,最终得到黄色橡胶弹的初始三维位姿如表 5-6。

表 5-6 初始位置物体的三维姿态

	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Roll($^\circ$)	Pitch($^\circ$)	Yaw($^\circ$)
初始位姿	-339.99	162.80	1263.02	-8.16	7.32	94.04

5.4.2 运动目标模拟测量实验

在运动目标测量中,振镜会随着运动目标的高速运动而发生旋转,从而得到清晰的图像,而运动目标模拟测量实验就是去模拟这一过程。运动目标模拟实验:将黄色橡胶弹置于机械臂夹爪,通过改变机械臂位姿来改变黄色橡胶弹位姿。同时,改变双振镜的旋转角度以达到振镜视野跟随测量目标的运动效果,从而完成运动目标模拟测量实验,其测量精度可以以机械臂自身的位姿变换为标准。

测量目标选用黄色橡胶弹,以机械臂移动的位姿为准确值,旋转振镜的外参通过 VBC 外参估计获得。同时由于双振镜的扫描方向是绕 y 轴的,故在模拟测量实验中需要时刻移动机械臂的 x 轴方向,以达到橡胶弹始终处于振镜视野中的效果。以首张左侧图片为标准坐标系,再通过标定的方式获得第一张图像相对于世界坐标系的相对姿态为 $(-21.72^\circ, 9.38^\circ, -3.23^\circ)$,最终将所有的位姿进行转移到世界坐标系中进行误差分析。振镜 a、b 的初始角度为 $(\Delta a, \Delta b) = (-2.00^\circ, -1.75^\circ)$,

每次旋转 0.25° ，对应机械臂的 x 轴大概移动 5mm，机械臂 y 轴、z 轴每次移动一定角度。通过以上方式，拍摄 11 张图像，首张图像为初始图像，故可以得到 10 组数据。结果具体如表 5-7，测量目标 x 轴的平均相对误差为 1.46%，位置的平均总相对误差为 2.89%。

表 5-7 模拟运动目标相对位置测量

序号	x 轴机械臂位移 (mm)	x 轴测量位移 (mm)	x 轴绝对误差 (mm)	x 轴相对误差 (%)	机械臂总位移 (mm)	测量总位移 (mm)	位移总绝对误差 (mm)	位移总相对误差 (%)
1	4.98	5.08	0.10	2.01	4.98	5.18	0.20	4.02
2	9.99	10.24	0.25	2.50	11.16	10.64	-0.52	4.66
3	15.01	14.72	-0.29	1.93	16.57	16.99	0.42	2.53
4	19.97	19.58	-0.39	1.95	22.91	22.04	-0.87	3.80
5	25.00	25.23	0.23	0.92	28.72	29.58	0.86	2.99
6	29.99	30.31	0.32	1.07	35.01	35.72	0.71	2.03
7	35.01	34.51	-0.50	1.43	40.93	40.05	-0.88	2.15
8	40.00	39.65	-0.35	0.88	47.15	48.99	1.84	3.90
9	44.98	45.38	0.40	0.89	53.14	53.62	0.48	0.90
10	49.99	50.48	0.49	0.98	59.37	60.52	1.15	1.94

对于模拟运动姿态测量，由于姿态的变化并不涉及空间位置上的改变，为了使目标随着振镜的旋转仍投影于图像中心，因此在改变姿态的同时添加 x 轴位移的改变。遵循上述振镜初始位置和改变规律，x 轴每次移动 5mm，机械臂每次绕 x 轴、y 轴、z 轴旋转一定角度，拍摄 11 张图像进行测量。测量结果具体如表 5-8，测量目标的 x 轴平均相对误差为 1.83%，姿态的平均总相对误差为 3.99%。

表 5-8 模拟运动目标相对姿态测量

序号	x 轴机械臂位移 (mm)	x 轴测量位移 (mm)	x 轴绝对误差 (°)	x 轴相对误差 (%)	机械臂总姿态变换 (°)	测量总姿态变换 (°)	姿态总绝对误差 (°)	姿态总相对误差 (%)
1	4.99	5.07	0.08	1.60	-4.89	-5.07	-0.18	3.68
2	10.00	9.85	-0.15	1.50	-7.09	-7.49	-0.40	5.64
3	14.99	15.26	0.27	1.80	-8.66	-8.25	0.41	4.73
4	20.03	19.99	-0.04	0.20	-12.26	-12.54	-0.28	2.28
5	25.01	25.68	0.67	2.68	-15.32	-15.81	-0.49	3.20
6	30.00	30.67	0.67	2.23	5.05	5.21	0.16	3.17
7	35.01	36.05	1.04	2.97	7.12	6.82	-0.30	4.21
8	39.97	40.88	0.91	2.28	8.63	8.97	0.34	3.94
9	45.00	44.38	-0.62	1.38	12.22	12.66	0.44	3.60
10	50.02	50.85	0.83	1.66	15.35	14.51	-0.84	5.47

通过对上述数据的分析,从误差来源可分为以下几个部分。首先,因为振镜在旋转中是水平方向进行扫描,运动目标模拟测量实验需要不断地改变测量目标在世界坐标系下的 X 轴位移,所以在精度验证时所以在位置和姿态的精度验证时,都会叠加一定的误差。其次是 VBC 外参估计本身也会产生一定的误差,由于振镜每次旋转的角度较小,其测量的精度误差会被放大,从而影响系统的测量精度。最后,同相对位姿测量,其系统本身的基线、测量算法、标定精度也会对系统的测量精度产生影响。但从平均总相对误差精度来看,其测量误差相对稳定,可验证测量算法的有效性。

5.4.3 高速运动目标位姿测量实验

从高速运动目标的位姿测量实验采用的发射装置如图 5-3,该发射系统的速度可达到约 40m/s,这也为拍摄系统提供了新的挑战。基于 VBC 的外参估计需要首张图像和最后一张图像有相同的视野,用于放置标定板进行外参估计。同时,在高速运动中拍摄到的图像并不是都是清晰可测量的,比如在一些角度,找到的特征点数量无法支持测量需求。因此本文对于高速运动目标测量,就事先拍好图像序列,选择特征点满足测量需求的图像,并找到与之对应的振镜角度,再对图像序列对应的虚拟相机进行 VBC 的外参估计,从而进行位姿测量。

该发射装置采用 10×34mm 的淡紫色橡胶弹,在橡胶弹上添加 AHPU 的黑色特征点,高速相机的帧率为 1500,镜头焦距为 60mm。通过调节双振镜的初始角度,将初始的拍摄视野保持在枪口位置,从而用于跟踪测量目标的运动轨迹,此时双振镜对应的角度为 $(\Delta a, \Delta b) = (-12.16^\circ, -12.00^\circ)$ 。通过上述的跟踪拍摄系统拍摄子弹的运动轨迹,根据图像的清晰度,分别选择初始阶段的 6 张图像,中间阶段的 6 张图像,后面阶段的 6 张图像。通过对应找到与之对应的振镜旋转角度,通过对虚拟相机采用 VBC 的外参估计。以每个阶段的初始图像的左侧图像进行标定,求得该图像与高速运动目标的姿态矩阵,将初始图像对应的相机坐标系通过姿态矩阵转移到世界坐标系中。本次实验在运动过程中, c 在振镜发生旋转到振镜停止旋转,共拍摄到 74 张图像,对应的每个振镜角度旋转了 32° ,根据计算可得到每张图像之间的度数差为 0.43° 。在得到每张图像对应的振镜角度后,通过后面的离线 VBC 估计虚拟相机相对外参,从而进行高速目标的位姿测量。

初始阶段是运动目标刚离开发射口，脱离相机自身阴影遮挡后的清晰图像，此时双振镜的角度仍处于负值。初始阶段从第 7 帧图像开始到第 17 帧图像，其初始图像（第 7 帧图像）对应的双振镜夹角为 $(\Delta a, \Delta b) = (-9.15^\circ, -8.99^\circ)$ ，拍摄效果如图 5-9 所示，从跟踪系统进行分析，其在图像上的运动轨迹从跟不上到跟上进行过度。

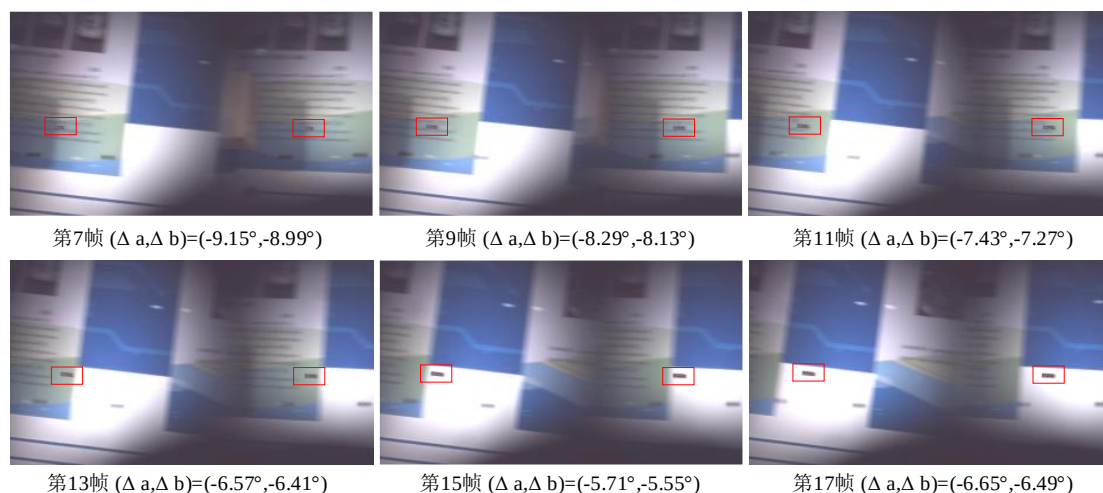


图 5-9 运动目标初始阶段的 6 张图像

初始阶段以第 7 帧对应的左侧图像坐标系进行标定，可得到左侧图像对应的虚拟相机与运动目标平面的位姿角度为 $(-17.96^\circ, 18.95^\circ, 2.18^\circ)$ ，通过以上初始位姿测量、相对位姿测量得到初始阶段高速运动目标的运动轨迹图如图 5-10 所示。

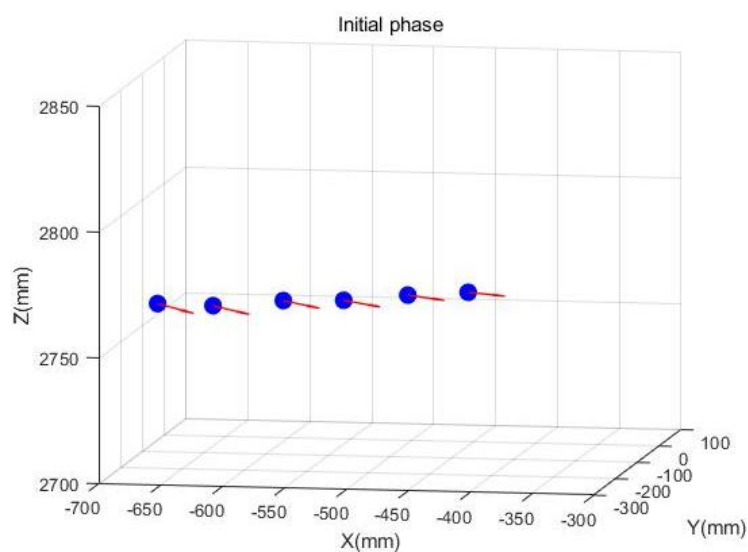


图 5-10 初始阶段 6 张图像对应的空间轨迹图

中间阶段是运动目标与测量系统最近的一个阶段，也是双振镜的旋转角度会从负值到正值过渡的一个阶段。中阶段从第 25 帧图像开始到第 35 帧图像，其初始图像（第 25 帧图像）对应的双振镜夹角为 $(\Delta a, \Delta b) = (-1.41^\circ, -1.25^\circ)$ ，拍摄效果如图 5-11 所示。

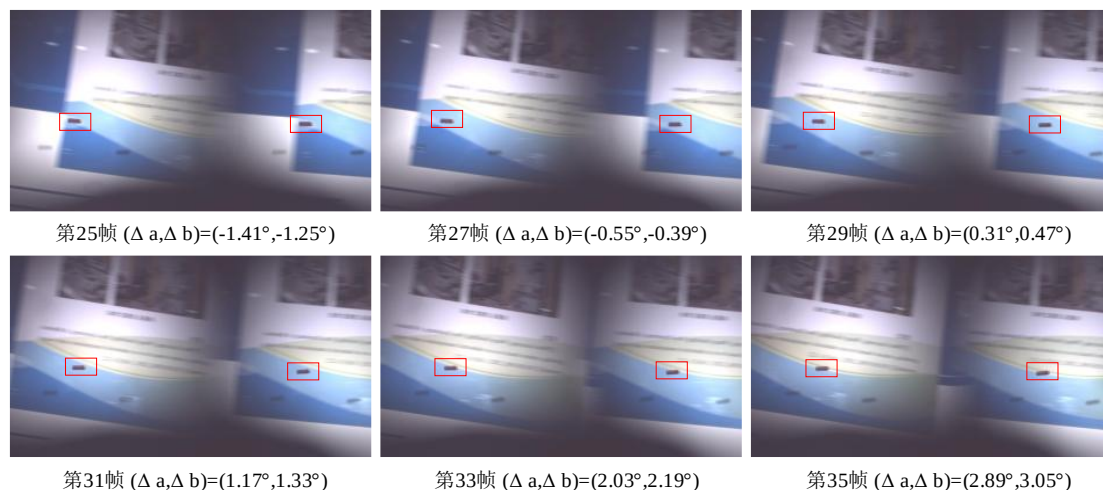


图 5-11 运动目标中间阶段的 6 张图像

中间阶段以第 25 帧对应的左侧图像坐标系进行标定，可得到左侧图像对应的虚拟相机与运动目标平面的位姿角度为 $(-20.76^\circ, 3.12^\circ, 1.28^\circ)$ ，通过以上初始位姿测量、相对位姿测量得到的中间阶段运动轨迹图如图 5-12 所示。

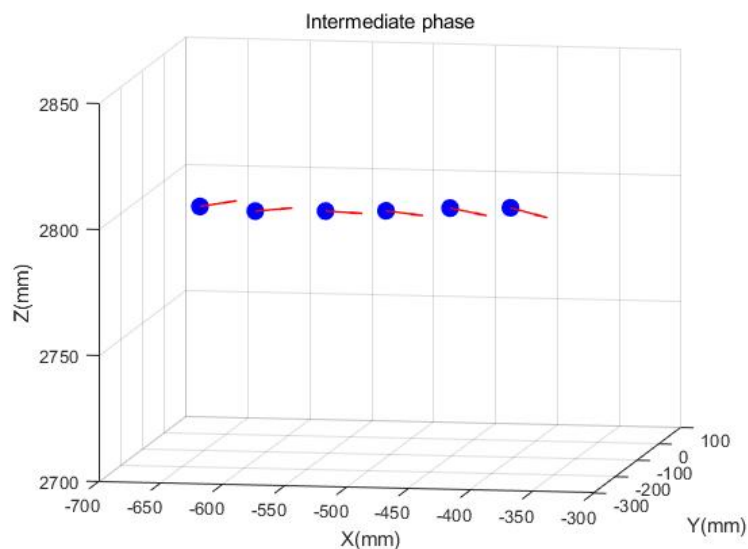


图 5-12 中间阶段的 6 张图像对应的空间轨迹图

最后阶段是运动目标远离测量系统的一个阶段，双振镜的旋转角度始终是正值，且越来越大。结尾阶段从第 44 帧图像开始到第 54 帧图像，其初始图像（第 44 帧图像）对应的双振镜夹角为 $(\Delta a, \Delta b) = (6.76^\circ, 6.92^\circ)$ ，拍摄效果如图 5-13 所示，往后的图像由于光源等问题，图像不够清晰。

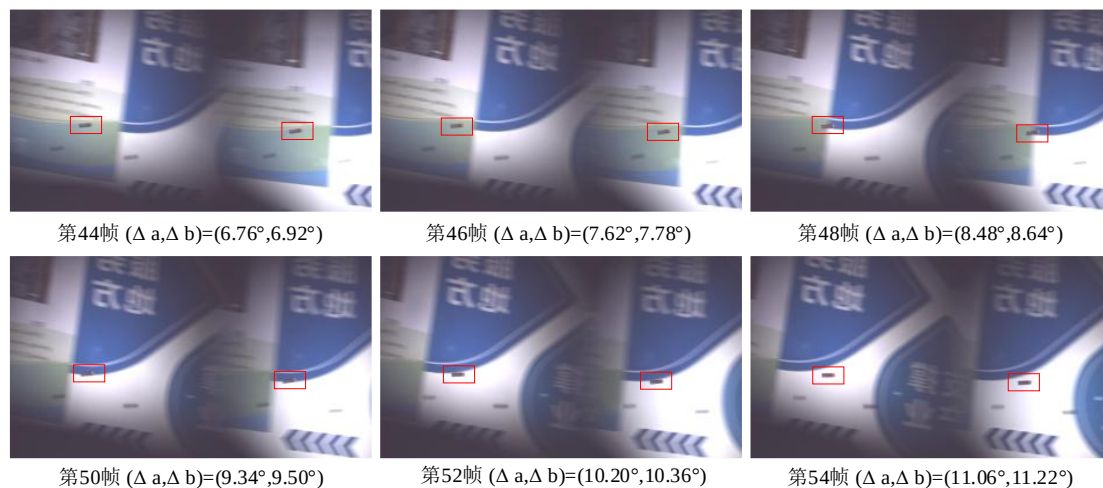


图 5-13 运动目标最后阶段的 6 张图像

最后阶段以第 44 帧对应的左侧图像坐标系进行标定，可得到左侧图像对应的虚拟相机与运动目标平面的位姿角度为 $(-23.19^\circ, -14.05^\circ, 0.88^\circ)$ ，通过以上初始位姿测量、相对位姿测量得到的最后阶段运动轨迹图如图 5-14 所示。

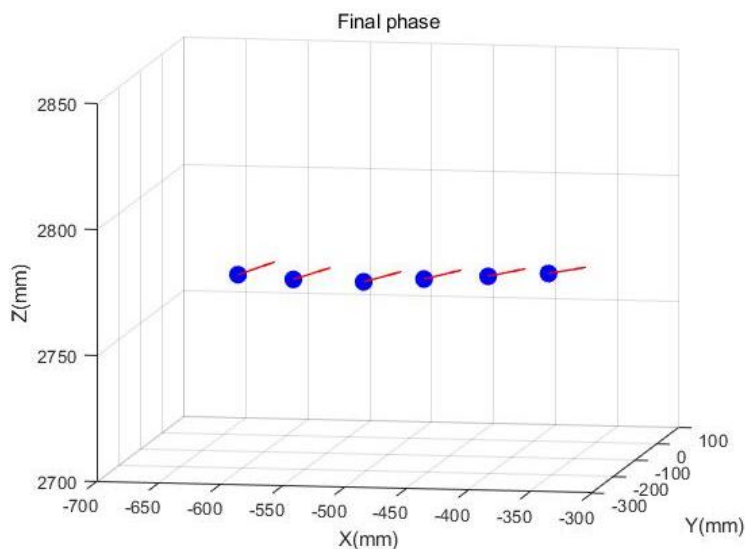


图 5-14 后面阶段的 6 张图像对应的空间轨迹图

如图 5-10、图 5-12、图 5-14 所示，由于三个阶段空间轨迹图的坐标系都是

以首张图像对应的世界坐标系为标准,在单个空间轨迹图中,由于世界坐标系与运动轨迹对应的平面相平行,其深度(Z轴)数值变化规律不大,X轴由于空气阻力的影响,运动目标处于一个减速的运动,在相同时间内,X轴的变化量会逐渐减小,Y轴受重力的影响,也呈现减小的趋势,其姿态角随着目标在空间中的受力情况而变化。将三幅图进行对比分析,双振镜角度接近于 0° 的时候,此时测量目标的深度最大,由于此时的世界坐标系离运动轨迹平面最远,其X轴、Y轴由于受力的影响,呈现减小的趋势。总体来说,高速运动目标位姿测量实验结果符合其运动轨迹,可说明本文提出的算法可行性。

5.5 对比试验

表 5-9 与其他测量方法的比较

测量模型	位置测量误差	适用性	成本	测量范围
多传感器 ^[81]	6%	低	低	-
传感器+相机 ^[82]	1.9%	较低	较高	-
单相机+四振镜 ^[52]	1.8%	中	中	50%
单相机 ^[83]	5%	高	较低	100%
多相机 ^[84]	0.5%	低	高	>100%
单相机+双振镜	1.96%	较高	较低	227%

如表 5-9 所示,在位置的测量误差中,多相机由于其非接触、高精度的测量方法,其位置测量误差精度最低为 0.5%,本文采用的方法与单相机+四振镜类似,但由于双振镜的放置方式不同,虚拟相机形成的基线长度小于单相机+四振镜的模式,其测量误差略高于单相机+四振镜的模式。从适用性上分析,适用性最高是单相机,测量所需要的条件最少,非接触式的测量适用于大多数场景,但无法测量深度,本文采用单相机加双振镜由于其摆放位置简单,采用的也是传统的光学测量,其适用性也较高,可测量深度信息。从成本对比分析,相机本身的价格较高,相对的基于传感器的测量方法耗材较低,同时由于振镜本身的价格不高,故相机加振镜这种测量模式相对于多相机的耗材较低。最后,从测量范围上进行对比分析,基于传感器的测量方法的范围与本身的传感器相关,且对应参考文献未提及,故本文就传感器的测量范围不做比较。假设单相机的测量范围为 100%,单相机+四振镜的方法由于要形成两条光路,牺牲了本身的测量范围,多相机的

测量视野取决于采用相机的数量。本文的测量视野由于可旋转的双振镜扩大了单相机的测量范围，并且仰角相机的本身避免了测量范围的丢失，其测量范围为单相机的 2.27 倍，具体推导见 2.5 小节。

总体来说，本文提出的单相机加双振镜的测量系统，在保证精度的同时，具有较高的适用性，较低的成本和较大的测量范围。

5.6 本章小结

在本章中，我们成功搭建了高速运动目标测量系统的实验平台，并对拍摄效果进行了测试。实验结果表明，该装置能够实现对高速运动目标的凝视跟踪拍摄，确保两个振镜都可以在单相机上对同一目标进行成像。接下来，本章验证了测量算法，采用高精度机械臂和姿态传感器进行了静态实验。对测量数据与算法计算结果进行比较后，得出在正常光照条件下，目标位移的平均相对误差为 1.96%，而姿态角的平均相对误差为 3.29%。完成静态实验后，由于基于几何方法我们无法得到精准的外部参数，本系统采用基于 VBC 的外参估计进行了动态模拟实验，其平均位置相对误差为 2.89%，平均姿态相对误差为 3.99%，可证明测量算法和 VDID 外参估计的有效性。最后分析了测量系统对高速运动目标所拍摄的图像，对图像进行分批处理，实验结果表明我们的算法依旧稳定工作，证实了本课题设计的可行性。

第 6 章 总结和展望

6.1 总结

本文的主要研究内容围绕着高速运动目标的位姿测量展开。传统方法中，单目拍摄无法测量目标的深度信息，而双目和多目测量由于在拍摄高速目标时存在同步性问题，导致难以对高速目标进行清晰成像和精确测量。同时，双目和多目测量设备价格偏高，且测量视野较窄。此外，传统的直接拍摄模式拍摄到的高速目标会产生残影，影响后续的图像处理。本文基于以上问题，采用单相机加双振镜的测量模式，利用振镜旋转跟踪高速运动目标，可以获得较为清晰的图像。随后对振镜旋转模型进行研究，为跟踪测量提供了理论支持。最后通过实验验证三维位姿测量算法在该系统下的测量精度，实现了双振镜测量系统在高速运动目标姿态测量上的应用。本文的主要贡献如下：

(1) 为了实现对高速运动目标进行跟踪和三维测量，本文设计了一种单相机加双振镜的高速目标测量系统，该系统由单个高速相机、两个大小适宜的振镜、控制系统和光纤传感器组成，通过双振镜形成立体视觉，从而进行三维测量。同时双振镜高速测量目标的移动而旋转，从而达到跟踪的效果，适用不同速度测量目标的跟踪拍摄。此外，本文对单相机与双振镜系统的构成进行了详细分析，包括放置位置（水平或仰角）、相机仰角的范围、振镜数量的选择以及尺寸的确定。最后，对比分析了水平放置和仰角放置的测量范围。

(2) 为了实现双振镜系统对目标的大范围跟踪测量，双振镜的旋转是关键。同时，研究双振镜旋转引起的虚拟相机位置变化也至关重要。通过研究双振镜旋转模型，采用几何和 VBC 两种方法进行外参估计。基于几何的外参估计方法难以获得准确的外部参数，而基于 VBC 的外参估计方法则利用旋转角度与虚拟相机位置的一一对应关系，避免了系统结构引入的误差。最后，通过建立世界坐标系，将测量到的位姿统一到同一坐标系中进行对比分析。

(3) 在完成双振镜拍摄系统的构建和运动模型的研究后，系统为高速运动目标的拍摄和测量提供了条件。接下来，对拍摄得到的图像进行测量和分析。与

传统的基于中轴线的测量方式不同,本文将三维位姿测量算法分为两部分,包括初始位姿测量和相对位姿测量。初始位姿测量用于确定目标在世界坐标系下的三维位姿。为了保证测量准确性,位置测量采用传统的加权重心法,姿态测量则结合 Hough 直线检测与 Sift 特征点匹配。在初始姿态测量中,首先提取图像中目标长边对应的两条边缘线夹角,确定目标中轴线的夹角;随后,在匹配的特征点中,找到与中轴线夹角最接近的一组特征点,从而确定目标的三维姿态。相对姿态测量在保证精度的同时简化了测量步骤,采用多图像特征点匹配与点云配准的方法。将世界坐标系下的左右图像与当前坐标系下的左右图像进行匹配,分别得到两组不同坐标系下的三维坐标。将当前坐标系下的三维坐标转换到世界坐标系下。最后通过点云匹配,得到当前目标相对于世界坐标系下目标的相对位姿。

(4) 进行实验验证。在实验室搭建了双振镜测量平台和模拟高速运动目标发射器,测试拍摄系统的成像效果。实验结果表明,测量系统能够拍摄到清晰的运动目标图像。随后,以高精度机械臂作为基准,通过对静止目标的位姿测量来验证算法的准确性。实验结果表明,位置测量的平均相对误差为 1.96%,姿态测量的平均相对误差为 3.29%。然后,进行了模拟运动目标的测量测试。通过同时移动测量目标位姿和调整双振镜的旋转角度,采用 VBC 方法估计虚拟相机的外参。实验结果表明,位置测量的平均相对误差为 2.89%,姿态测量的平均相对误差为 3.99%。最后,对高速目标进行拍摄测量,测量得到的位姿变化与高速目标的运动规律符合,验证了算法的有效性。

6.2 展望

本文主要解决的问题是针对高速运动目标的位姿测量,围绕这一问题设计了单相机加双振镜的测量系统,并通过实验验证算法的可行性,但由于时间、实验条件、自我能力等因素,针对该课题的研究依旧有着欠缺的地方,还需要后续针对特定问题进行研究和纠正,具体问题如下:

(1) 实验对光路强度要求较高。仰角相机加双振镜的从发点是好的,但拍摄方式是通过双振镜反射而来,相比于直接拍摄,光路在反射过程中会产生丢失,因此对光线强度有更高的要求,其次振镜表面的光洁度也会影响光线的反射效果。

后续可以通过改用更大口径的光圈来增加入射光线的强度和选择光洁度更好的镜子用来反射入射光路。

(2) 双振镜测量系统对测量精度的影响。仰角相机加双振镜测量系统中由于要通过双振镜将同一目标反射到同一测量平面,其对应的双目测量基线距离较低,在立体视觉测量中,其测量精度与两个相机之间的基线距离相关,较近的基线距离会影响测量精度。后续可以通过增加对应的补偿算法提高测量精度。

(3) 双振镜跟踪系统的控制方式较为简单,振镜采用离散的位置点分别进行控制,导致其运动连续性较差,可能使目标与振镜之间产生相对位移。同时,振镜的旋转与视野变化呈非线性关系,还需考虑运动模糊的影响,可能导致目标移出拍摄视野。后续需进一步优化跟踪算法,同时兼顾算法的运行效率,以确保振镜运动的流畅性。

参考文献

- [1] Chen Y, Yi H, Liao C, etc. Visual measurement of milling surface roughness based on Xception model with convolutional neural network[J]. Measurement, 2021, 186: 110217.
- [2] Banús N, Boada I, Xiberta P, etc. Design and Deployment of a Generic Software for Managing Industrial Vision Systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(3): 2171-2186.
- [3] Moemen M Y, Elghamrawy H, Givigi S N, etc. 3-D reconstruction and measurement system based on multimobile robot machine vision[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-9.
- [4] Hong X, Wang W, Liu Q. Design and realization of fire detection using computer vision technology[C]//2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2019: 5645-5649.
- [5] Budiharto W, Andreas V, Suroso J S, etc. Development of tank-based military robot and object tracker[C]//2019 4th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). IEEE, 2019: 221-224.
- [6] Bhatti M T, Khan M G, Aslam M, etc. Weapon Detection in Real-Time CCTV Videos Using Deep Learning[J]. IEEE Access, 2021, 9: 34366-34382.
- [7] Hisey R, Camire D, Erb J, etc. System for central venous catheterization training using computer vision-based workflow feedback[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2021, 69(5): 1630-1638.
- [8] Sun Y, Liang L, Sun J, etc. A binocular vision SSVEP brain-computer interface paradigm for dual-frequency modulation[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2022, 70(4): 1172-1181.
- [9] Zhang K, Cao Z, Liu J, etc. Real-time visual measurement with opponent hitting behavior for table tennis robot[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(4): 811-820.
- [10] Li S, Liang B, Gao X, etc. Pose measurement method of non-cooperative circular feature based on line structured light[C]//2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). IEEE, 2016: 374-380.
- [11] Sun X, Zhang Z, Bi D, etc. Accurate Monocular Pose Measurement for Aircraft Transportation Monitoring[C]//2024 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). IEEE, 2024: 1672-1676.
- [12] Kim D, Song H, Khalil H, etc. 3-D vibration measurement using a single laser scanning vibrometer by moving to three different locations[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2014, 63(8): 2028-2033.
- [13] Wang L, Li X. The solution to the binocular vision measurement system oriented to high-dynamic range process[C]//2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). IEEE, 2017: 715-720.

- [14] Sa G, Yin X, Wu H, etc. Real-time suture reconstruction in rat skin stretching experiments with multiocular stereo vision measurement system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-14.
- [15] 胡祖威.基于振镜的三维激光雷达扫描系统研究[D].广州大学,2024.
- [16] 王德田,彭其先,刘俊等.激光干涉测速技术在内弹道弹丸速度测量中的应用研究[J].高压物理报,2011,25(02):133-137.
- [17] 冯智勇,曾瀚,张力等.基于陀螺仪及加速度计信号融合的姿态角度测量[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(04):137-141.
- [18] 马秀丽.基于磁阻/陀螺组合测量弹体飞行姿态的数据融合方法研究[D].南京:南京理工大学,2012.
- [19] 傅忠云,朱海霞,孙金秋等.基于惯性传感器 MPU6050 的滤波算法研究[J].压电与声光,2015,37(05):821-825.
- [20] 牛春峰.弹道环境下的陀螺/GPS 组合姿态测量方法研究[D].南京:南京理工大学,2015.
- [21] 邵艳巡,邓林红,戎海龙.基于惯性—地磁组合的多模型融合姿态测量算法[J].传感器与微系统,2023,42(01):109-112.
- [22] Wu Y, Wu G, Li L, etc. Inner shifting-phase method for high-speed high-resolution 3-D measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 7233-7239.
- [23] Yin W, Feng S, Tao T, etc. High-speed 3D shape measurement using the optimized composite fringe patterns and stereo-assisted structured light system[J]. Optics express, 2019, 27(3): 2411-2431.
- [24] Liang J, Wang L V. Single-shot ultrafast optical imaging[J]. Optica, 2018, 5(9): 1113-1127.
- [25] Zuo C, Chen Q, Gu G, etc. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(8): 953-960.
- [26] 吴周杰,张启灿.基于条纹投影的高速三维形貌测量技术发展综述[J].激光与光电子学进展,2023,60(08):11-41.
- [27] 周全,王飞行,文贡坚.基于狭缝摄影的靶场目标运动测量综述[J].现代电子技术,2010,33(19):54-57.
- [28] 李冬冬.基于交比不变量的狭缝摄影测量相机标定和晃动问题研究[D].国防科学技术大学,2014.
- [29] 何鑫,王云峰,景金荣,等.基于 NanEyeM 的电子内窥镜高速成像系统[J].国外电子测量技术,2021,40(12):56-60.
- [30] 乔志旺.基于高速成像技术的外场弹丸运动姿态测量方法研究[D].南京理工大学,2019.
- [31] 何林泽,韩先平.高速弹丸轨迹精度影响因素研究[J].测控技术, 2020,39(11):7-12.
- [32] Yan B, Paolini E, Xu L, etc. A target detection and tracking method for multiple radar systems[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-21.

- [33] 朱阁彦.基于波束成形算法的三维风速风向测量方法[D].吉林大学,2020.
- [34] Gao X, Qian R, Zhang Y, etc. Improved pulse laser ranging algorithm based on high speed sampling[C]//Advanced Laser Manufacturing Technology. SPIE, 2016, 10153: 294-299.
- [35] 王俊.基于自动驾驶的激光雷达测距技术研究[D].电子科技大学,2020.
- [36] Mohanapriya D, Mahesh K. Multi object tracking using gradient-based learning model in video-surveillance[J]. China Communications, 2021, 18(10): 169-180.
- [37] Okumura K, Yokoyama K, Oku H, etc. 1 ms Auto Pan-Tilt video shooting technology for objects in motion based on Saccade Mirror with background subtraction[J]. Advanced Robotics, 29(7), 457-468.
- [38] 张正涛,徐德.基于智能摄像机的高速视觉系统及其目标跟踪算法研究[J].机器人,2009,31(03):229-234+241.
- [39] 王义琼,王力超,李子阳,等.偏转速度实时修正的弹道跟踪系统设计[J].兵器装备工程学报,2023,44(03):204-209.
- [40] 李子阳.基于扫描振镜的高速运动目标凝视跟踪系统研究[D].安徽工程大学,2023.
- [41] Wang B, Jin Y, Chen Y, etc. Gaze tracking 3-D reconstruction of object with large-scale motion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-12.
- [42] 曹彦鹏,赵博闻,沈凝,等.基于二维振镜的动态目标实时跟踪与高保真信息采集系统[J].计测技术,2023,43(01):143-153.
- [43] Li Y, Fu Y, Zhong K, etc. A virtual binocular line-structured light measurement method based on a plane mirror[J]. Optics Communications, 2022, 510: 127974.
- [44] Feng X, Fang B. Algorithm for epipolar geometry and correcting monocular stereo vision based on a plane mirror[J]. Optik, 2021, 226: 165890.
- [45] Wang L, Liu J, Hong J, etc. A three-dimensional trajectory measurement system for quasi-one-dimensional high-speed moving objects[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(12): 125903.
- [46] Zhou F, Chen Y, Zhou M, etc. Effect of catadioptric component postposition on lens focal length and imaging surface in a mirror binocular system[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5309.
- [47] Chen Y, Zhou F, Wang L, etc. Imaging model of the off-axis non-central spherical mirrored stereo vision sensor[J]. Measurement, 2023, 208: 112457.
- [48] Chen Y, Wang B, Li Q, etc. Field-of-view-enlarged single-camera 3-D shape reconstruction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-12.
- [49] Wang L C, Dong J H, Cheng Q Y, etc. Velocity measurement of moving target based on rotating mirror high speed camera[J].Optical Engineering.2023, 62:10.104102.
- [50] Han Z, Zhang L. A virtual multi-ocular 3D reconstruction system using a galvanometer scanner and a camera[J]. Sensors, 2023, 23(7): 3499.

- [51] Han Z, Zhang L. Modeling and calibration of a galvanometer-camera imaging system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.
- [52] Yu L, Pan B. Single-camera high-speed stereo-digital image correlation for full-field vibration measurement[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 94: 374-383.
- [53] Yu L, Pan B. Single-camera stereo-digital image correlation with a four-mirror adapter: optimized design and validation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 120-128.
- [54] 宋振东,姜伟.单目多视点立体图像提取及应用[J].光学学报, 2012,32(05):147-152.
- [55] Zhong F, Quan C. A single color camera stereo vision system[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 18(4): 1474-1482.
- [56] Jerde C L, Visscher D R. GPS Measurement Error Influences on Movement Model Parameterization[J]. Ecological Applications,2005,15(3):806-810.
- [57] 赵龙.惯性导航原理与系统应用设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2020.
- [58] Shalaby M, Cossette C C, Forbes J R, etc. Relative position estimation in multi-agent systems using attitude-coupled range measurements[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(3): 4955-4961.
- [59] 魏敏,吴国华,周进,等.序列图像轴对称物体中轴线提取方法[J].半导体光电,2007,(1):143-146.
- [60] 丁少闻.针对目标姿态测量的中轴线测算方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2013.
- [61] 赵构.基于靶道阴影照相的弹丸气动力参数辨识研究[D].南京:南京理工大学,2015.
- [62] 乔志旺.基于高速成像技术的外场弹丸运动姿态测量方法研究[D].南京:南京理工大学,2019.
- [63] 段偲丽.基于 ZYNQ 双目视觉弹体姿态测量方法研究[D].南京:南京理工大学,2019.
- [64] 彭骏,段菲,孙忠辉,等.弹丸图像的中轴线提取方法研究[J].电子测量技术,2021,44(12):110-114.
- [65] Akinlar C, Topal C. EDLines: A real-time line segment detector with a false detection control[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(13): 1633-1642.
- [66] 赵全兴.基于立体视觉的飞行目标姿态与转速测量技术[D].西安工业大学,2023.
- [67] Zhang J, Ren L, Deng H, etc. Measurement of unmanned aerial vehicle attitude angles based on a single captured image[J]. Sensors, 2018, 18(8): 2655.
- [68] Guo S, Zhao Z, Guo L, etc. A method for measuring the absolute position and attitude parameters of a moving rigid body using a monocular camera[J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 11863.

- [69] FISCHLER M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Commun. ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [70] Gao X S, Hou X R, Tang J, etc. Complete solution classification for the perspective-three-point problem[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2003, 25(8): 930-943.
- [71] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EP n P: An accurate O (n) solution to the P n P problem[J]. International journal of computer vision, 2009, 81: 155-166.
- [72] Kneip L, Li H, Seo Y. Upnp: An optimal o (n) solution to the absolute pose problem with universal applicability[C]//Computer Vision–ECCV 2014: 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6-12, 2014, Proceedings, Part I 13. Springer International Publishing, 2014: 127-142.
- [73] Brachmann E, Krull A, Nowozin S, etc. Dsac-differentiable ransac for camera localization[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017: 6684-6692.
- [74] Zhang X, Wang W, Qi X, etc. Stereo plane slam based on intersecting lines[C]//2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2021: 6566-6572.
- [75] 纪运景,杜思月,宋旸,等.基于线结构光旋转扫描和光条纹修复的三维视觉测量技术研究[J].红外与激光工程,2022,51(02):470-478.
- [76] 李洪儒,基于深度学习的结构光全方位三维测量技术研究.四川省,四川大学,2023-06-07.
- [77] 苗成桐,吴静静,徐强强.结构光测量中分区域相位误差自校正方法[J].激光与光电子学进展,2025,62(04):252-261.
- [78] Wightman R, Touvron H, Jégou H. Resnet strikes back: An improved training procedure in timm[J]. arxiv preprint arxiv:2110.00476, 2021.
- [79] Liang Z, Zhao K, Liang G, etc. MAXFormer: Enhanced transformer for medical image segmentation with multi-attention and multi-scale features fusion[J]. Knowledge-Based Systems, 2023, 280: 110987.
- [80] Liu J, Fan X, Jiang J, etc. Learning a deep multi-scale feature ensemble and an edge-attention guidance for image fusion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 32(1): 105-119.
- [81] Murmu N, Chakraborty B, Nandi D. Relative velocity measurement using low cost single camera-based stereo vision system[J]. Measurement, 2019, 141: 1-11.
- [82] Bo L, Chen G. Measurement method based on stereo vision for nozzle motion[C]//2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. IEEE, 2012: 1413-1416.
- [83] Shan F Q, Wang F, Zhang H F. Research on 3D pose measurement algorithm based on binocular vision[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 1792(1): 012043.

- [84] Dai Y, Li H. Multi-Camera digital image correlation in deformation measurement of civil components with large slenderness ratio and large curvature[J]. Materials, 2022, 15(18): 6281.

攻读学位期间发表的学术成果

论文发表情况:

Wang L, Liu J, Hong J, et al. A three-dimensional trajectory measurement system for quasi-one-dimensional high-speed moving objects[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(12): 125903.

专利发表情况:

王力超, 刘俊楠, 耿树巧, 缪陆, 刘飞瑶, 基于双振镜的近一维高速运动目标三维姿态测算方法及系统, 2024101207116。

致谢

时光如梭，从大一初次刚踏入这所学校，再到研三结束自己的求学生涯，转眼间我的学生生涯即将画上句号。回首这段求学之路，充满了挑战与收获，也让我深刻体会到科研工作的艰辛与乐趣。在此，我怀着无比感激的心情，向所有在我求学过程中给予帮助和支持的老师、同学、家人和朋友致以最诚挚的谢意。

首先，我要衷心感谢我的导师王力超。遇到您是我的幸运，感谢您在学术上的悉心指导和生活上的关怀。从论文选题到实验设计，从数据分析到论文撰写，您始终以严谨的治学态度和渊博的学识为我指明方向。您的耐心教诲和无私支持让我在科研道路上不断成长，也让我深刻理解了工科研究的严谨性与创新性。

感谢 516 实验室的全体老师和各位师兄师姐和学弟学妹。感谢董家辉学长在实验过程中提供的宝贵建议和技术支持，感谢缪陆和刘飞瑶同学协助我完成实验，感谢曹圣学、林腾飞、包俊涛对我学习和生活中的帮助。实验室的团结协作氛围让我感受到集体的力量，让我在遇到困难也敢勇于前行，也让我在科研道路上不再孤单。

感谢我的家人，特别是我的父母。你们一直默默支持我的学业，给予我无条件的爱与鼓励。你们的理解与包容是我前进的动力，让我能够全身心投入到科研工作中。

最后，也同样感谢坚持不懈的我。感谢自己在迷茫时，仍锲而不舍，选择正确的道路。感谢自己在高压下，能够及时调整自己的状态，投入接下来的学习和工作。感谢自己不断的前行，向着自己的目标不断靠近。

尚德敏学 唯实惟新

