

单位代码: 10363

学 号： 2220320173

目 录

Research on key techniques for Measuring linear velocity and roll velocity Of High-speed flying target

研究方向（领域）：控制工程

论文答辩日期: 2025 年 05 月 06 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：刘飞瑶.

日期：2025 年 05 月 15 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：刘飞瑶. 指导教师签名：王力军.

日期：2025 年 05 月 15 日

日期：2025 年 05 月 15 日

高速飞行目标线性速度与滚转速度测量关键技术研究

摘 要

随着视觉测量技术在公共交通、航空航天、军事技术等领域的广泛应用,通过高速相机和图像传感的方式拍摄并测量高速飞行目标的运动参数具有非接触、高精度的优势,逐渐成为了当前的热门研究方向之一。传统的机器视觉方法在测量运动目标的参数时,往往采用多目系统或借助移动云台来实现对目标的跟踪拍摄。但是,这些方法的系统成本要求较高且难以适用于高速飞行目标的跟踪拍摄,无法准确的测量高速飞行目标的运动学参数。针对这些问题,本文采用基于扫描振镜的凝视跟踪系统,该系统能够以较低的成本实现对高速飞行目标的跟踪拍摄,并提出了特征点三维重构法和自适应相似度评估法实现了对高速飞行目标线性速度和滚转速度的高精度测量。

本文具体研究内容与成果如下:

(1) 研究并设计了基于扫描振镜的拍摄系统。该系统利用扫描振镜加高速相机组合成新的拍摄测量系统,研究内容主要包括整体框架设计、核心设备的选型、光路结构的设计、运动模型的建立等。跟踪实验表明,该系统可以在单目相机的基础上,完成在较大的视场范围内对飞行目标的跟踪拍摄,并且有效避免了运动模糊问题,为后续的运动参数测量工作提供了平台。

(2) 提出了一种基于特征点三维重构的飞行目标线性速度测量方法。由于本文的拍摄系统采用单目相机和高速振镜的组合,无法直

接获取目标的视差图。因此，本文采用重构单应矩阵的方法将目标特征点进行三维重构，计算虚拟相机之间的外参矩阵和目标在虚拟相机中的投影点来实现三维重构，随后再进一步计算目标的线性速度。实验表明，该方法可以完成对飞行目标线性速度的测量，实验相对误差在 2.05%左右。

(3) 提出了一种基于背景自适应和相似度评估的飞行目标滚转速度测量方法。基于图像相似度的转速测量方法无需在目标上进行辅助标记，具有低成本、高效率的优势。由于本文测量高速飞行目标的滚转速度，受到动态背景的影响，无法直接对目标图像进行相似度评估。因此，本文通过采用基于背景自适应的方法进行动态背景下的目标提取，随后对目标进行相似度评估，通过 Chirp-Z(CZT)变换计算周期，获得滚转速度。实验表明，在转速 0-1000 转/分钟范围内，该系统最大相对误差在 $\pm 0.65\%$ 以内。

(4) 在多种实验条件下对该测量系统进行性能测试，实验结果表明该测量系统具有较高的精确性和鲁棒性。研究光照条件、拍摄帧率、图像分辨率等不同实验条件对该测量系统性能的影响，分析实验结果，探究系统最佳工作参数。另外，通过与其他测量方法的比较，验证了该方法在测量精度和系统成本上的优越性。

关键词：高速飞行目标，扫描振镜，视觉测量，线性速度，滚转速度

RESEARCH ON KEY TECHNIQUES FOR MEASURING LINEAR VELOCITY AND ROLL VELOCITY OF HIGH SPEED FLYING TARGET

ABSTRACT

With the extensive application of visual measurement technology in domains such as public transportation, aerospace, military technology, etc., shooting and measuring the motion parameters of high-speed flying targets through high-speed cameras and image sensing methods possess the advantages of non-contact and high precision, gradually emerging as a current popular research direction. When measuring the parameters of moving targets, traditional machine vision approaches typically adopt multi-camera systems or rely on mobile gimbals to achieve tracking and shooting of the targets. However, these methods have relatively high system cost requirements and are difficult to be applicable for tracking and shooting high-speed flying targets, unable to accurately measure the kinematic parameters of high-speed flying targets. In response to these issues, this paper employs a gaze tracking system based on scanning galvanometers. This system can achieve tracking and shooting of high-speed flying targets at a lower cost and proposes the three-dimensional reconstruction method of feature points and the

adaptive similarity evaluation method to realize high-precision measurement of the linear velocity and roll velocity of high-speed flying targets.

The specific research contents and achievements of this paper are as follows:

(1) Research and design a shooting system based on scanning galvanometer. This system uses scanning galvanometer and high-speed camera to form a new shooting measurement system. The research content mainly includes the overall frame design, the selection of core equipment, the design of optical path structure, and the establishment of motion model. The tracking experiments show that the system can track and shoot the flight target in a large field of view based on the monocular camera, and effectively avoid the motion blur problem, which provides a platform for the follow-up motion parameter measurement.

(2) A linear velocity measurement method for flying targets based on 3D reconstruction of feature points is proposed. Because the shooting system in this paper adopts the combination of monocular camera and high-speed galvanometer, the parallax map of the target cannot be obtained directly. Therefore, this paper adopts the method of reconstruction homography matrix to reconstruct the target feature points in 3D, calculates the external parameter matrix between virtual cameras and the projection point of the target in the virtual camera to achieve 3D

reconstruction, and then further calculates the linear velocity of the target. The experimental results show that this method can complete the measurement of the linear velocity of the flying target, and the experimental relative error is about 2.05%.

(3) A rolling velocity measurement method for flight targets based on background adaptation and similarity evaluation is proposed. The speed measurement method based on image similarity does not require auxiliary marking on the target, which has the advantages of low cost and high efficiency. Due to the impact of dynamic background on the rolling velocity of high-speed flying targets measured in this paper, similarity evaluation of target images cannot be carried out. Therefore, this paper adopts the background adaptive method to extract targets under dynamic background, and then evaluates the similarity of targets. The rolling speed is obtained by Chirp-Z(CZT) transformation calculation period. The experimental results show that the maximum relative error of the system is within $\pm 0.65\%$ in the range of speed 0-1000 (RPM).

(4) The performance of the measurement system is tested under various experimental conditions, and the experimental results show that the measurement system has high accuracy and robustness. The effects of different experimental conditions such as illumination, frame rate and image resolution on the performance of the measurement system are studied, the experimental results are analyzed, and the optimal working

parameters of the system are explored. In addition, the superiority of this method in measurement accuracy and system cost is verified by comparing with other measurement methods.

Feiyao Liu (Electronic information)

Supervised by:Lichao Wang

KEY WORDS: High speed flying target, scanning galvanometer, visual measurement, linear speed, roll speed

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	3
1.2.1 飞行目标视觉测量系统研究现状	3
1.2.2 飞行目标线性速度测量技术研究现状	7
1.2.3 飞行目标滚转速度测量技术研究现状	10
1.3 本文主要研究内容及章节安排	12
1.3.1 主要研究内容	12
1.3.2 本文章节安排	13
1.4 本章小结	14
第 2 章 基于扫描振镜的测量系统设计	15
2.1 本章引言	15
2.2 系统框架和工作原理	15
2.3 系统光路模型设计	17
2.4 扫描振镜旋转模型设计	22
2.5 本章小结	26
第 3 章 基于特征点三维重构的飞行目标线性速度测量方法研究	28
3.1 本章引言	28
3.2 视觉测量与标定原理	28
3.2.1 成像原理与标定	28
3.2.2 立体视觉成像	30
3.3 特征点的提取与匹配技术	31
3.3.1 SIFT 基本原理	32
3.3.2 SIFT 算法核心步骤	33
3.4 特征点三维重构与线性速度的计算	37
3.4.1 特征点三维重构	37
3.4.2 重构单应矩阵法	38

3.4.3 飞行目标线性速度计算	42
3.5 本章小结	43
第 4 章 基于自适应相似度法的飞行目标滚转速度测量方法研究	44
4.1 本章引言	44
4.2 滚转速度测量技术路线	44
4.3 飞行目标跟踪及相似度评估	45
4.3.1 自适应背景差法	45
4.3.2 图像相似度评估法	48
4.4 周期性计算方法研究	49
4.4.1 滑动短时窗函数处理	50
4.4.2 算法研究	50
4.5 本章小结	53
第 5 章 实物实验与结果分析	54
5.1 本章引言	54
5.2 实验平台搭建与测试	54
5.2.1 平台搭建	54
5.2.2 飞行目标拍摄实验	57
5.3 线性速度测量实验与结果分析	58
5.4 滚转速度测量实验与结果分析	61
5.5 本章小结	65
第 6 章 总结与展望	66
6.1 总结	66
6.2 展望	67
参考文献	69
攻读学位期间发表的学术论文目录	75
致 谢	76

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

在公共交通、航空航天、军事技术等领域中，通常需要测量高速飞行目标的运动学参数^[1-3]，如目标的线性速度和滚转速度，用以分析目标的运动状态，这对进一步理解目标运动过程、评估运动效率、实现运动控制和运动仿真模拟以及对后续的设计优化有着至关重要的意义^[4-5]。由于目标处于高速运动状态，如图 1-1，在实际测量中，往往会存在复杂实验环境的干扰以及目标本身难以捕捉的问题，对测量环境和设备的要求较高，测量难度大。

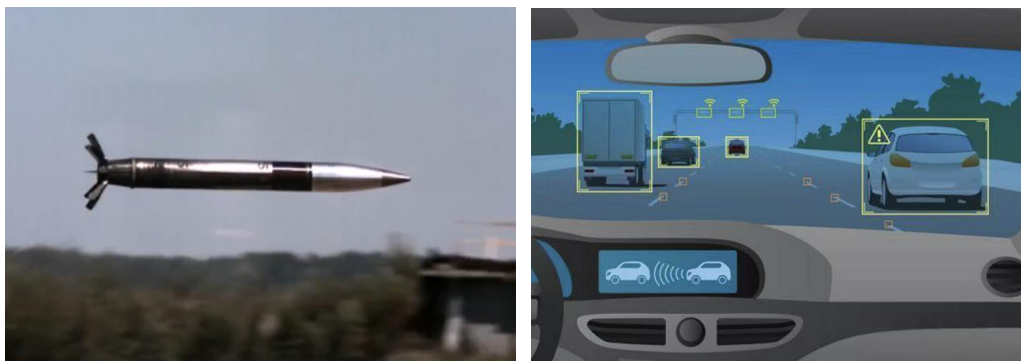


图 1-1 应用背景

随着测量技术的发展与进步，层出不穷的测量方法被应用于实际测量中，其主要分为雷达技术、传感器技术和计算机视觉技术。雷达技术属于无线电外测设备^[6]，对目标的运动状态有着很高的敏感度，通常用于测量目标的距离、速度等参数，可适用于复杂天气下的测量实验。但是，雷达技术成本较高，难以广泛使用。常见的传感器技术包括陀螺仪、加速度计、光学传感器等^[7-9]。这种接触式测量方式需要在目标表面或内部结构安装传感元件，通过传感器监测可直接获取目标的运动参数。虽然该方法有着较高的测量精度，但是，安装在目标内部的传感元件很可能会影响目标的运动状态，而且，在许多特殊场合或微小型被测目标上无法安装传感元件，导致无法完成测量任务。另外，传感器的采样频率和响应速率可能较低，这会导致对快速变化的加速度或速度捕捉不精确，进而造成数据延迟和失真。在处理高速运动目标的测量数据时，通常会遇到大量噪声和干扰，因此需要进行有效的信号处理和数据滤波。这样会导致处理和分析数据的复杂性

大大增加，需要更为复杂的算法和技术支持，给测量带来了不便^[10-11]。

近年来，基于计算机视觉的测量方法凭借其非接触、高精度、高效率的优势受到研究者的青睐。与传统的雷达技术和传感器技术相比，计算机视觉方法通过捕捉目标的运动轨迹图像，对图像进一步处理分析可以得到目标的运动参数，如距离、深度、位姿、速度、转速等^[12-15]。另外，该方法具有非接触、适应性强的优势，适用于微小目标等特殊条件下的测量，给研发人员带来了极大的便利，具有重大的研究意义和应用价值。

传统的计算机视觉测量方法是指沿着目标的运动轨迹放置一台高速相机，获取目标运动的图像序列。但是相机的拍摄视场有限，导致可获取的运动轨迹范围有限，所以在太视场下捕捉运动目标的轨迹往往需要放置多台高速相机（图 1-2）或者借助云台（图 1-3）改变相机的视角^[16-18]来进行拍摄。放置多台相机拍摄需要考虑相机的同步和标定，以及对后续的图像拼接问题的处理，这些问题不但导致拍摄成本大大增加，而且拼接过程中容易遗漏图像关键信息，导致运动信息不准确，降低了测量精度。

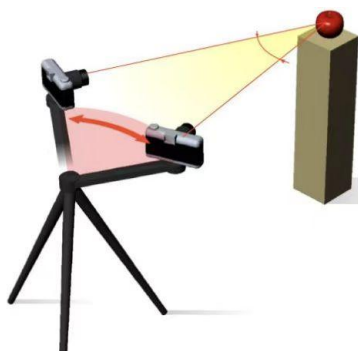


图 1-2 双目视觉系统

云台的使用可以在一定程度上降低测量成本，也避免了图像拼接问题，但是受限于拍摄设备的体积与重量，云台的移动速度和转速往往无法满足高速运动目标的跟踪拍摄需求。



图 1-3 云台拍摄系统

为了应对这些问题，研究者们又提出了基于扫描振镜的凝视跟踪拍摄系统^[19-21]，如图 1-4，该跟踪系统将可旋转振镜安装在相机视场前方，通过调整振镜的旋转速率与偏转角度，改变成像设备的观测范围，实现对运动物体的连续追踪拍摄，从而获取完整的运动过程图像序列。该装置利用振镜结构紧凑、响应迅速的特点，在单目视觉系统中即可完成高速运动目标的捕捉任务，有效解决相关技术难点，为后续分析高速移动目标的运动特性提供了可靠的图像数据基础。



图 1-4 凝视跟踪系统

基于上述背景，本课题研究设计了一种基于扫描振镜的运动目标拍摄系统，对模拟高速飞行目标进行跟踪拍摄，并提出相应的运动学参数计算方法，获取飞行目标的线性速度和滚转速度。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 飞行目标视觉测量系统研究现状

利用计算机视觉的方法对飞行目标进行拍摄测量是测量领域重要的研究方法，该方法凭借其非接触、高精度、高效率的优势成为测量领域的热点^[22-24]，主

要包含传统的单目系统、测量多维度信息的多目系统和测量运动目标的凝视跟踪系统等。计算机视觉测量系统最早是于 20 世纪 70 年代由美国科学家 David Marr^[25]首次提出，在之后的几十年里，随着数字图像处理、计算机图形学和机器学习等领域的发展，计算机视觉测量逐渐得到了更多的关注和应用。

时至今日，基于计算机视觉的拍摄系统已取得长足的发展，其中传统的单目系统在拍摄飞行目标时主要分为狭缝摄影法和阴影照相法。狭缝摄影法，也称为绳影法或条影法，是一种利用光线通过一个狭缝进入相机，形成条纹状影像的摄影技术，如图 1-5 所示。通过控制胶片运动补偿目标的运动，使得目标在曝光拍摄时没有产生相对位移，常用于拍摄运动物体或快速变化的场景，通过条纹的变化来展示物体的运动轨迹或变化过程^[26]。

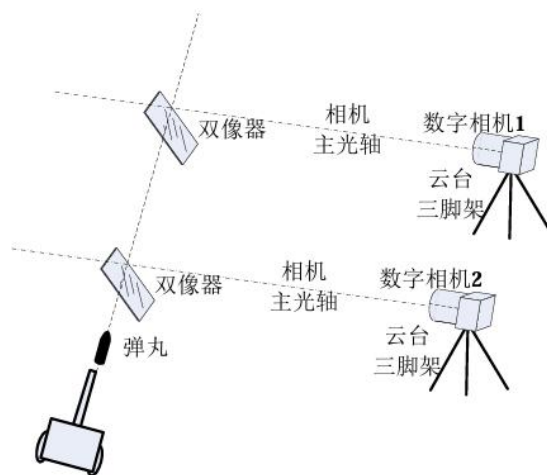


图 1-5 数字狭缝摄影测量系统

李冬冬^[27]设计了一种新的拍摄方法，旨在解决狭缝相标定和相机晃动带来的问题。该技术通过实施图像校正处理，有效抑制了相机抖动导致的成像偏差。在狭缝摄影测量领域，周全研究团队^[28]系统性分析了该成像体系的技术特征，完整梳理了此类设备的技术发展脉络，并创新构建了基于该技术的高速运动目标多参数同步解算模型，重点建立了飞行器线速度、角速度与章动角等动力学参数的精确测量数学模型。针对旋转参数测量问题，马永忠科研团队^[29]创新设计了双狭缝同步摄影系统，突破单设备测量模式的技术限制。验证实验显示，这种多基线空间观测方案使弹体转速测量精度获得显著提升，相对误差较常规方法减少 87% 以上，成功克服了战术导弹低速旋转工况下测量精度不足的技术难题。狭缝摄影法可以捕捉到飞行目标的运动轨迹和变化过程，其功耗小、成本低，这对于观察

和分析目标的运动特性有着重要意义,但是,该系统对光线要求较高且难以拍摄高速运动的目标。

阴影照相法是一种利用光影变化来拍摄飞行目标的摄影技术。该方法通常使用快速的快门速度和光线条件,在目标飞过时捕捉到其在空中留下的阴影,如图 1-6 所示。这些阴影可以反映出飞行目标的形状、姿态和运动轨迹,从而在图像中呈现出清晰的轮廓和特征^[30-31]。

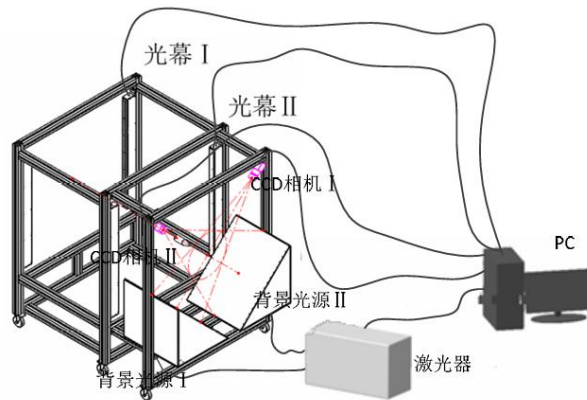


图 1-6 激光阴影照相测速装置测量系统

谢爱民团队^[32]研发的多序列激光阴影成像装置突破了传统高速摄影设备的经济性瓶颈,其通过时空编码技术构建了多序列同步成像体系,空间分辨率优于 $5\mu\text{m}$,时间分辨率达纳秒级。该技术不仅实现了碰撞试验中粒子运动轨迹的三维重构与碎片云演化过程的可视化分析,更可扩展应用于超燃冲压发动机流场结构解析等极端环境下的瞬态测量。张文博^[33]系统构建了模块化激光阴影测试系统架构,创新性地采用共轴离焦照明技术研制出脉宽 10ns 、单脉冲能量 500mJ 的组合式激光光源。研究团队通过 ZEMAX 光学仿真平台优化了物方远心光路设计,建立了激光能量密度与图像信噪比的量化关系模型,为航天器微陨石防护系统的超高速撞击实验提供了可靠的光学观测手段。Wang^[34]等人根据磁场驱动飞片的物理过程,研制了一种由超高速转镜条纹相机、适用于相机光学系统的缩微透镜和连续激光光源组成的超高速摄影系统。采用串联电光开关,避免了相机成像板上的重复曝光,减弱了碰撞过程中产生的强光,在国内首次获得了电枪驱动飞片的一维清晰条纹图像。阴影照相法的优势在于能够在瞬间捕捉到飞行目标的真实形态,使图像更加生动和具有动态感。然而,操作和调试较为复杂,在拍摄过程中

需要一定的技术和经验要求，因为对光线条件和快门速度的控制要求较高，以确保图像的清晰度和质量。

在大视场范围下拍摄飞行目标或对目标进行三维重构时，传统的单目系统难以完成。为此，国内外研究者们提出多目系统和凝视跟踪系统来完成这些拍摄任务。多目拍摄系统指的是利用两个或两个以上的相机拍摄目标，常用于拍摄飞行目标的运动轨迹或对目标进行三维建模。王天宇^[35]等人设计了基于多目机器视觉的城市轨道交通自动化监控系统，该系统可有效实现城市轨道交通自动化监控，监控及时性较好，应用效果良好。Huang^[36]等人对多摄像机视觉测量系统的全局标定进行了研究，提出了一种方便的基于平面目标的多相机系统全局标定方法，该方法可以使两个目标之间的位姿关系未知。该方法不仅适用于基于立体视觉的系统，也适用于基于单目视觉的系统。多目系统虽然可以完成大视场的拍摄，但是该系统往往伴随着高成本以及繁杂的后期图像拼接处理工作，为此，研究者们提出了凝视跟踪系统^[37-39]。云台的出现一定程度上降低了系统的成本，通过借助云台的平移或旋转改变相机的拍摄视角，实现凝视跟踪拍摄的效果。蔡亲立课题组^[40]构建了基于嵌入式视觉处理平台的智能识别追踪系统架构，其采用改进型YOLOv5 算法实现 98.7%的目标识别准确率，通过 EtherCAT 总线协议实现 8 个摄像头节点的毫秒级同步控制。该系统创新性地集成二维高精度云台与多模态传感器融合算法，在智能仓储 AGV 调度系统中实现动态目标跟踪定位误差小于 2cm，为工业 4.0 环境下的移动机器人集群协同提供了新型解决方案。针对水下探测特殊工况，盖超会团队^[41]研发的深海双轴伺服云台系统取得技术突破，该装置采用 316L 不锈钢压力壳体结合动态流体补偿算法，可在 2.5m/s 湍流速度下保持 0.1° 的指向精度，成功应用于南海可燃冰勘探工程。但是，由于受限飞行目标的速度和相机的质量，难以实现高速飞行目标的跟踪测量。为了完成高速飞行目标的大视场跟踪拍摄测量，研究者们提出了扫描振镜加高速相机的组合系统，在相机视角前放置一面可旋转的平面镜，通过平面镜反射运动目标，将目标影像传递给高速相机，如图 1-7 所示，以较低的成本实现对高速运动目标的凝视跟踪拍摄。最早由英国 MS 公司^[42]开发了 Flight Follow 系统，用于高速飞行目标的跟踪和拍摄。东京大学实验室开发了一种基于二维振镜的跟踪系统，通过双轴振镜调整相机视角，从而在平面内捕捉运动目标^[43]。

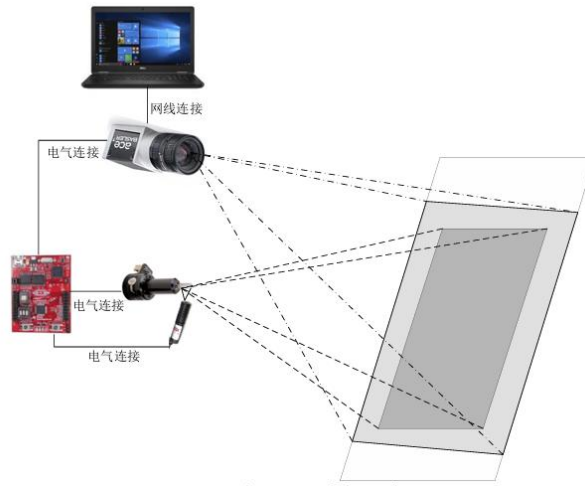


图 1-7 凝视跟踪系统示意图

在先进光学成像技术领域,西安电子科技大学许子琪团队^[44]研制了六轴联动激光投影系统,其采用多振镜协同控制算法实现 $\pm 5 \mu\text{m}$ 的扫描精度。通过建立振镜群位姿误差补偿模型,成功将3D打印中的投影畸变降低85%,已应用于航空复合材料无损检测。郭根^[45]开发的模块化振镜扫描系统集成20kHz高频激光调制模块,通过Zynq-7020异构计算架构实现亚微秒级同步控制,在航天器燃料管路焊缝检测中使成像效率提升3倍。吴迪^[46]提出的高速光片成像系统创新性融合转镜分幅技术,实现 $2 \mu\text{m}$ 分辨率活体成像,满足IEC 60825激光安全标准,成功捕捉斑马鱼胚胎神经发育动态过程。

通过比较上述不同的高速飞行目标拍摄测量系统,基于扫描振镜的凝视跟踪系统可以实现在大视场范围下对高速飞行目标进行跟踪拍摄,且该系统操作简单,成本较低,能够适用于大多数特殊场合。因此,本课题设计了基于扫描振镜的高速飞行目标拍摄系统,并研究相应的测量算法,利用获取的目标图像序列测量飞行目标的运动学参数。

1.2.2 飞行目标线性速度测量技术研究现状

线性速度是分析目标运动状态的一个重要参数,国内外学者对此进行了大量的研究,测量的主要方式包含雷达测速法、激光传感法和计算机视觉法等。其中,雷达技术可以通过发射和接收无线电波来探测目标并测量其速度,Shen^[47]等人提出了一种利用毫米波雷达探测静态物体测量列车速度的方法,利用毫米波雷达获取和处理目标数据,该方法测量误差小于1.5 m/s,具有成本低、测量速度快、

精度高等特点。在核辐射监测技术领域,王迪团队^[48]创新性构建了基于 K 波段连续波多普勒雷达的车辆污染监测系统。该装置采用 FMCW 调频技术实现±0.2km/h 的测速精度,通过卡尔曼滤波算法将误报率降低至 0.03%,相较传统红外开关测速方式检测效率提升 40%,成功应用于大亚湾核电站车辆出入监测,为海关辐射监测站提供了智能化的分级管控解决方案。雷达测速法精确度高,可实现远距离测速,但是高性能的雷达设备往往价格昂贵,成本太大。激光传感器法通过发送激光脉冲并测量脉冲返回的时间来计算目标与传感器之间的距离变化,进而推断目标的速度,栗继伟^[49]等人系统梳理了高超声速流场测速领域中典型非接触式激光测量技术的应用现状,重点对激光多普勒测速、粒子图像测速等核心方法展开对比分析,系统评述其技术特征并展望该领域发展动向。白帆^[50]等人通过分析 FMCW 激光雷达测速测距的基本原理与差频信号的时频特征,使用压缩采样结构——调制宽带转换器完成差频信号采样与处理,通过分频与各自移频频率以及采样频率的计算实现了物体速度和距离的测量。激光传感法具有高精度和实时性的优势,但是激光传感受环境影响较大,在测量前需要对系统进行多次调试安装。

计算机视觉作为热门测量技术之一,在飞行目标线性速度测量上更是大放异彩,包括光流法、相位相关法和特征点匹配法。如图 1-8 所示,展示了一种多相机测量目标线性速度的系统模型。

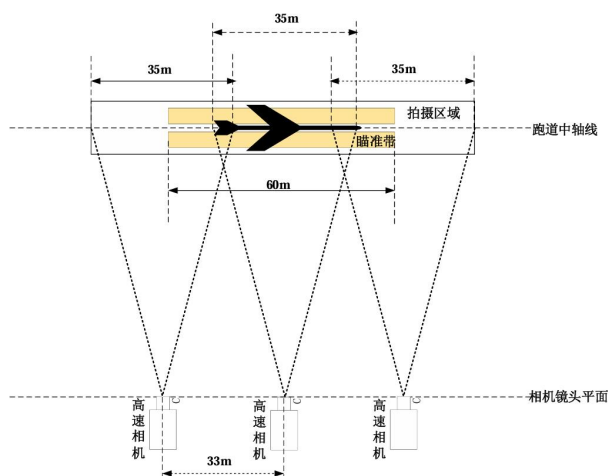


图 1-8 线性速度视觉测量系统

光流法是一种通过分析连续图像帧之间的像素位移来推断目标运动速度的方法。单良^[51]等人创新性地开发了基于光流金字塔架构的插值优化算法,该算法

针对粒子图像测速应用场景,在保持传统方法多尺度分析优势的同时,有效降低了速度场重建的角度偏差与均方根误差,实验数据表明,该方法通过引入自适应权重插值机制,在流场边界区域实现了梯度连续性优化,显著提升了复杂流场结构的重建精度。Schmidt B. E^[52]等人研究了一种基于小波的光流测速(wOFV)方法,使用了一系列数据集来评估基于标量的方法,包括来自2D和3D DNS集的被动标量场的合成图像对以及来自一系列湍流射流的实验数据。光流法适用于各种复杂环境,但是其需要目标图像的特征纹理要求较高,计算复杂。相位相关法同样和目标图像的像素值有关,该方法基于像素值的相似性来测量目标的运动速度。李木国^[53]等人介绍了相位相关法的匹配原理,提出了分层匹配后“伪粒子”的去除方法和相位相关运算的快速求解算法,使得相位相关匹配具有更佳的高效性与可靠性。黄彪课题组^[54]研发了基于FPGA的实时测速系统。该系统采用二维傅里叶变换相位相关算法,通过改进型汉明窗函数抑制频谱泄漏,实现相邻帧图像0.02像素级的位移解析精度。实验表明,在1ms采样间隔下,系统可在0.5-120m/s测速范围内保持 $\pm 0.15\%$ 的相对误差,该装置已成功应用于高速铁路接触网悬挂部件动态检测。相位相关法与光流法相似,两者可以结合使用,提高测量的精确度,但是同样也存在计算过程复杂和对特征纹理要求较高的问题。特征点匹配法通过在连续帧中提取和匹配目标物体的特征点,计算它们之间的位移来估计目标的运动速度,是计算机视觉中最常用的方法。Zhang^[55]等人提出了一种新的特征描述符,称为相对位置信息,它将LIC和最近参考点的RPI集成在一起,对局部特征的泡沫速度进行了精确的测量。Cao^[56]等人提出了一种新的机载河面流量测量技术——机载特征匹配测速技术(AFMV),它利用特征图像特征的匹配进行正校正和测速。赵亮研究团队^[57]攻克了低纹理输送带运动解析难题,创新性提出基于时空特征融合的鲁棒测速算法。该系统采用改进型ORB特征检测器实现98.2%的特征匹配准确率,通过RANSAC算法构建多帧运动估计模型。实验数据显示,在煤矿输送带监控场景中,该方案在0.1-8m/s测速范围内的相对误差 $\leq 0.35\%$,较传统光流法提升5倍精度。Du^[58]等人提出了一种结合模板匹配和特征点方法的基于视觉的方法,利用近距离和远距离监测装置实现毫米级的位移测量。

由于本研究采用扫描振镜系统进行拍摄测量,目标处于近一维的高速运动状

态，每帧图像所对应的相机视角和矩阵参数不同，传统的特征点法无法直接计算目标的实际位移。综合上述目标线性速度的测量方法，提出了一种基于特征点三维重构的方法，结合扫描振镜拍摄系统完成对高速飞行目标线性速度的测量。

1.2.3 飞行目标滚转速度测量技术研究现状

滚转速度同样也是分析目标运动状态的重要参数之一，国内外研究人员对此展开了大量的测试研究，测量方法主要包括惯性测量单元法、传感器法和计算机视觉法等。惯性测量单元（IMU）是一种包含加速度计和陀螺仪的传感器组件，通过分析陀螺仪的输出数据，可以获取目标的滚转速度。陈晨^[59]等人采用自主研发的惯性测量单元，对自由泳运动中的身体转动姿态特征进行量化，以进行自由泳转动技术的诊断。雷一非研究团队^[60]系统构建了激光陀螺旋转调制惯导系统的理论框架。该研究提出基于遗传-粒子群混合算法的三轴动态调制策略，通过建立双傅里叶级数误差模型，实现载体角速度扰动下 $0.001^{\circ}/h$ 的零偏稳定性。针对高动态环境，团队创新性设计了 16 位置转位方案，并构建了包含 32 项误差源的补偿体系。实验表明，其角运动隔离效能系数达 0.93，已成功应用于某型潜射导弹的跨介质导航控制。但是 IMU 的测量结果对外界的干扰敏感，且需要其他传感器的辅助测量。在转速测量领域，常用传感装置主要包括光电式、磁感应式、霍尔效应式及接触式等类型，各类传感器在工程应用中呈现出不同的技术特性。基于磁流变效应传感原理，Shang 等人^[61]通过理论推导构建了传感器输出频率与弹体旋转速率的定量关系模型。Huang^[62]等人研究了一种基于 Terfenol-D 的光纤 Bragg 光栅（FBG）转速测量传感器，该传感器通过固定在旋转结构上的磁体产生旋转磁场。Terfenol-D 材料在旋转磁场作用下发生磁致伸缩。固定在 Terfenol-D 上的 FBG 传感器通过诱导 Terfenol-D 的应变来监测旋转机构的转速。Li^[63]等人提出了一种基于电磁感应信号的高速旋转角速度传感器，为大范围测量高角速度提供了可能，设计了一种基于电磁感应原理的角速率传感器。传感器用于测量转速具有许多优势，如高精度、实时性和非接触性等，但也存在环境适应性差、安装复杂、成本较高等问题。所以，选择合适的传感器时，需要综合考虑使用环境、转速范围、成本预算以及系统要求等因素。

与线性速度测量类似，计算机视觉法在目标滚转速度的测量方面也是应用广

泛，主要有特征点跟踪法、辅助标记法和相似度法。特征点跟踪通过在目标表面选择标志性的特征点，并利用计算机视觉算法进行跟踪，捕获特征点的位置变化，进而估算目标的滚转速度。

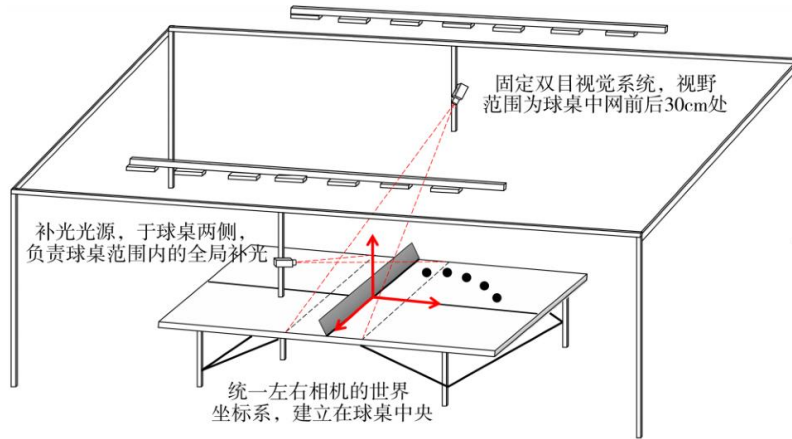


图 1-9 滚转速度视觉测量系统

史博等人^[64]系统分析发射参数对弹道特征点分布规律的影响机制，建立基于旋转特征量分析的弹道终点时空参数解算模型。在此基础上，研制集成磁场传感阵列的弹道终点实时监测装置，通过靶场实弹射击试验验证系统性能。试验结果表明，该辨识系统在典型工况下的终点时刻判断误差控制在 0.8ms 以内，满足弹道终点实时监测的工程精度要求。季云峰^[65]设计了一种基于单目摄像机计算乒乓球旋转速度的系统，如图 1-9 所示，主要利用连续 4 帧或随机 5 帧图像中商标的位移轨迹来进行计算，成功计算出旋转的速度大小和旋转轴的方向。Xu^[66]等人提出了一种新的基于三维点云序列的旋转运动参数估计算法，该算法由构造双配准矩阵和求解运动方程两个阶段组成，能够成功求解非合作目标的旋转轴方向和角速度。但是在测量没有明显特征点，或是在目标高速运动状态下，特征点模糊无法准确捕捉的情况下难以应用，为此研究者们提出了一种人为制造特征点的方法——辅助标记法。该方法通过人为的在目标表面粘贴标记，进而使用特定的算法对标记进行解算得出目标滚转速度。Zhong^[67]等人利用非投影复合条纹图案来获取轴的瞬时转速，在轴的表面粘贴复合条纹图案，通过对条纹图案的分析进一步计算目标转速。Wang^[68]等人介绍了一种基于低成本成像装置的转速测量系统，该系统在转子上有一个简单的标记。对序列图像进行去噪、直方图均衡化、圆霍夫变换等预处理，然后采用相似度评价方法得到目标转速。向丽^[69]等人在螺旋点

法的基础上提出螺旋线辅助标记法,成功获取飞行目标的滚转速度。但是粘贴标记对目标的运动特性会存在一定的影响,若是在测量微小目标或其他特殊场合中,无法对目标进行人为标记。为解决这一问题,Wang 等人提出一种基于相似度的滚转速度测量方法,该方法通过比较图像或视频序列中不同帧之间的相似度,解算相似度信号的变化周期来推测目标滚转速度^[70-71]。然而,当前的相似度测量方法仅适用于位置不发生相对运动的目标,在测量运动目标时,不断变化的背景信息会影响相似度的判断,导致测量不精确。

综合上述滚转速度的测量方法,结合本文所设计的扫描振镜拍摄系统,在无标记的情况下,传统的相似度评估法会受到动态背景的干扰,难以准确地计算目标转速。为实现高速飞行目标滚转速度的测量,提出一种基于背景自适应和相似度评估的飞行目标滚转速度测量方法,结合扫描振镜拍摄系统完成对高速飞行目标滚转速度的测量。

1.3 本文主要研究内容及章节安排

1.3.1 主要研究内容

本文进行了基于计算机视觉的方式对高速飞行目标的线性速度和滚转速度的测量关键技术研究。主要研究内容分为以下几个方面:

(1) 设计高速飞行目标拍摄测量系统,将扫描振镜与高速相机相结合,设计该系统各个部分的光路结构与数学模型,实现在大视场范围下捕获高速飞行目标图像序列的目标。

(2) 高速飞行目标线性速度测量方法研究,设计了基于单应矩阵的特征点三维重构的方法,将目标图像序列中的特征点进行三维重构,从而计算飞行目标的线性速度。

(3) 高速飞行目标滚转速度测量方法研究,研究了自适应背景差分法,设计了动态背景下飞行目标的相似度评估算法,进而计算飞行目标的滚转速度。

(4) 搭建实验平台,测试系统的拍摄效果,验证测量算法的精确性,并探究不同实验环境对测量结果的影响。

总体技术路线图如下:

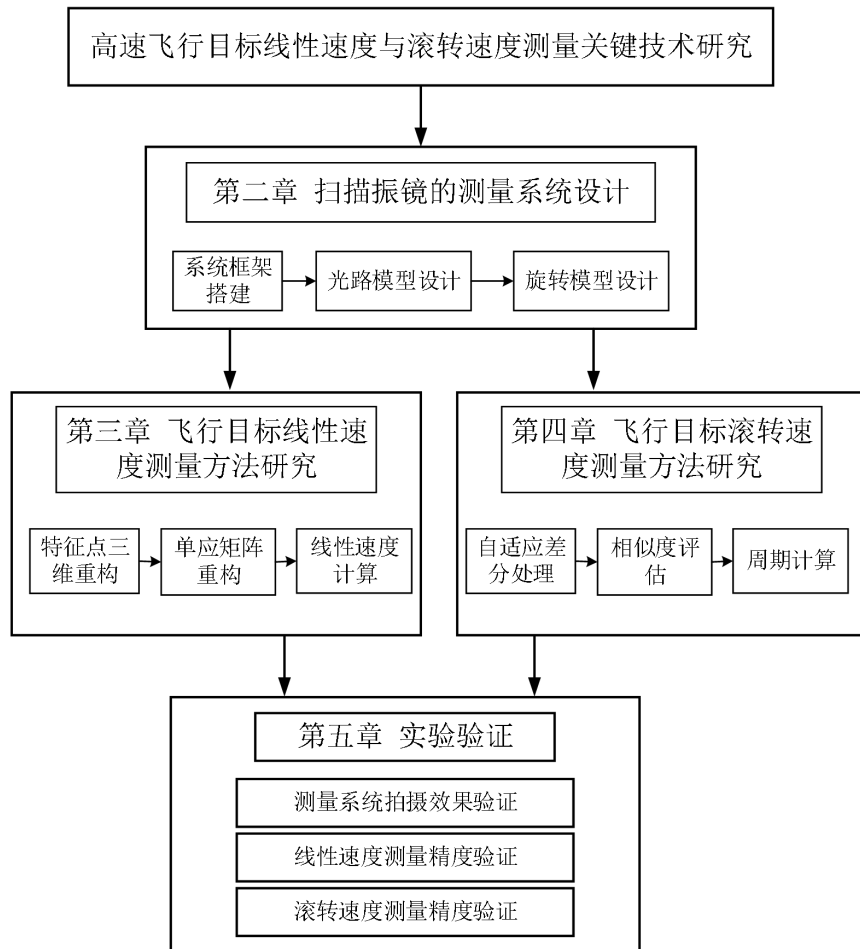


图 1-10 总体技术路线图

1.3.2 本文章节安排

本文共分为六个章节，具体安排如下：

第1章：绪论。论述了本课题的研究背景和意义，概述了计算机视觉测量技术、飞行目标线性速度和滚转速度测量方法的研究现状和局限性。提出了本文的主要研究内容和具体结构安排。

第2章：基于扫描振镜的测量系统设计。具体介绍了扫描振镜拍摄系统的工作原理和结构组成，分析了系统的光路结构、拍摄视场和振镜旋转的数学模型以及对各个器件的选型做了简单的阐述。

第3章：基于特征点三维重构的飞行目标线性速度测量方法研究。针对高速飞行目标测量系统拍摄的图像序列，在单目相机图像下无法直接进行传统方法的三维重构，因此设计了一种基于重构单应矩阵的算法，可计算特征点的虚拟对应

点来完成特征点的三维重构，从而实现对飞行目标的线性速度测量。

第 4 章：基于自适应相似度评估的飞行目标滚转速度测量方法研究。对于高速飞行目标测量系统拍摄的图像序列，受动态背景的影响，无法对其直接进行相似度评估，因此利用自适应差分法，设计了一种自适应相似度评估方法，可将动态背景剔除，对目标进行相似度评估，再根据周期算法完成对飞行目标滚转速度的测量。

第 5 章：实物实验与结果分析。完成了扫描振镜拍摄系统的搭建工作，并测试该系统的拍摄效果。对本文设计的线性速度和滚转速度的方法进行精度和稳定性验证，并对实验的影响因素进行了分析。

第 6 章：总结与展望。对本文的创新点和研究成果进行了总结，并指出了研究中的不足和对未来工作的展望。

1.4 本章小结

本章介绍了高速飞行目标运动参数测量的研究背景和现实意义，对视觉测量系统和测量方法做了大量的文献调研和研究，确定了本文的主要研究内容和目标，并说明本文的全文结构安排。

第 2 章 基于扫描振镜的测量系统设计

2.1 本章引言

本文通过计算机视觉的方式对高速飞行目标进行拍摄测量,需要先捕获飞行目标的高清图像序列。针对传统视觉测量系统在拍摄高速飞行目标时存在的成本高、复杂程度高、难以实现高速跟踪等问题,本章内容介绍了一种基于扫描振镜的拍摄测量系统,该系统以扫描振镜和高速相机为核心,将振镜放置在相机镜头合适的位置,利用振镜旋转快速改变相机的拍摄视角,使得高速飞行目标始终保持在相机的拍摄视角中央,从而以低成本、低复杂度实现了对高速飞行目标的跟踪拍摄。本章主要介绍了扫描振镜拍摄系统的工作原理、系统的光路模型设计以及振镜旋转模型的分析。

2.2 系统框架和工作原理

由于本文的拍摄系统是利用扫描振镜旋转改变相机视角,从而实现跟踪拍摄的效果。所以,要想让目标始终在相机视场中央,就必须保证振镜的旋转速度与目标飞行速度一致。为此,需要先测出飞行目标的初始速度,安装一套测速传感装置用于测量目标初速度,再将该速度信号传送到控制器进行处理,在得到目标初速度之后,由振镜运动曲线模型建立振镜角度变化曲线,最后将该信号转换为电信号控制振镜的旋转,同时控制高速相机触发,开始对目标进行拍摄。由于振镜跟随飞行目标的运动进行旋转,使得目标处于相机视场中央,且与视角保持相对静止,在扩大拍摄视场的同时,又消除了运动模糊问题,得到了高速飞行目标大视场范围下的清晰图像序列。

该拍摄系统的核心为扫描振镜的控制触发方式,其主要方式有两种:一种是单传感方式,将振镜的旋转模型和角度曲线提前建立完成,当传感器检测到目标时触发振镜旋转和相机拍摄,振镜按照预先设定的模型进行旋转,实现跟踪拍摄。该方法系统较为简单,易于实现。但是存在的弊端也是显而易见的,由于是预先测好目标的飞行速度将其储存在控制系统中,当测量不同的目标,不同的飞行速

度时，需要重新测量并进行模型更换，另外，当预测速度不准确时，会造成目标偏离、丢失等问题，给测量带来误差和不便。另一种方式是双传感方式，利用两个光纤传感器进行初速度测量。当目标经过首个传感器时，进入测速范围系统开始计时，当经过第二个传感器时系统停止计时，并根据传感器的距离计算目标的飞行速度传送至控制器中，由该测量速度计算振镜的旋转模型和角度曲线，实现对不同目标不同速度的跟踪拍摄。该方法较第一种多了一套传感设备，但是其更具灵活性，对不同速度的目标不需要另外重新计算，使得测量更加方便。因此，本文选择第二种方式设计拍摄系统。

本文的拍摄系统主要包含传感系统、控制系统、高速振镜系统和拍摄系统。整体结构图如图 2-1 所示：

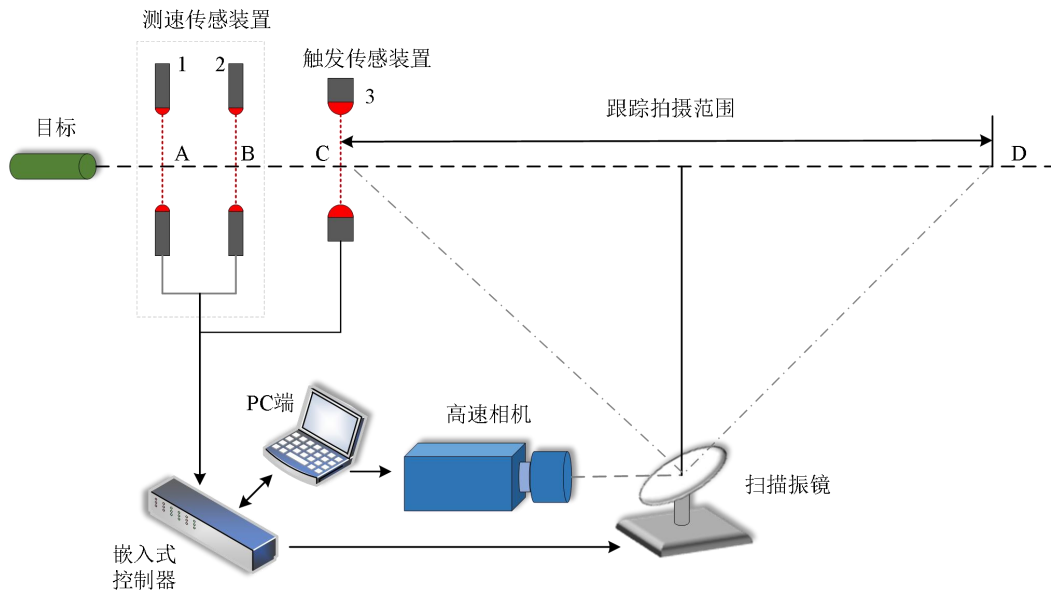


图 2-1 高速飞行目标测量系统结构图

在图 2-1 中由传感器 1，2 组成测速系统，传感器 3 作为控制触发系统，高速相机的视角对准振镜平面，将传感系统、PC 端、控制器、高速相机和扫描振镜相连接。当飞行目标发射后，随即穿越测速传感系统，经过 A 点时，被传感器 1 感知并触发控制系统开始计时，经过 B 点时，由传感器 2 感知，控制计时结束，通过结合目标的飞行距离 AB 和控制器所记录的时间得出目标的飞行速度。在得到飞行速度后，计算出振镜的旋转曲线和离散位置点，进而控制振镜跟随目标的飞行路线进行旋转，保证目标位于视场中央，减少目标在相机视场中的相对位移，避免高速运动模糊问题。另外，由于控制系统处理目标速度建立振镜

旋转曲线方程和离散位置点需要一定的响应时间,所以该系统将 BC 段设为控制响应时段,以确保控制器有足够的时间进行计算。在控制器对速度值分析计算完毕后,目标经过 C 点,被传感器 3 感知,传感器 3 作为控制触发系统,给高速相机和旋转振镜传递信号,使得振镜开始按照计算的模型进行旋转同时高速相机开始曝光拍摄。根据计算的旋转模型,CD 段为振镜的跟踪拍摄范围,系统可获取飞行目标在这一段的运动图像序列。系统选用检流计扫描振镜,利用电压调节振镜位置,不同的位置都对应不同的电压。在跟踪过程中,控制系统定期发送电压信号,使振镜以预定的角度旋转,确保高速相机可以持续凝视目标。相机通过记录振镜反射的图像,最终获取清晰的高速飞行目标图像序列,以供后续测量和分析之用。

2.3 系统光路模型设计

本文的高速飞行目标跟踪拍摄系统利用了振镜的反射原理,将目标图像映射到相机拍摄视角当中,因此,为了确保拍摄视场以及跟踪范围达到预期效果,需要对拍摄系统的光路结构模型进行研究设计。对于系统的光路模型,其核心问题为高速相机和扫描振镜的摆放位置以及角度关系,传统的光路模型为平行式结构,即扫描振镜与高速相机的视角在同一水平轴线上,如图 2-2 所示。高速相机的视角在振镜侧面,该模型不需要考虑相机与振镜之间俯仰角问题,相机始终可接受到来自振镜的反射图像,但是,该模型的弊端也是显而易见的,当振镜逆时针偏转角度到一定程度时,高速相机会与振镜反射面重叠,相机对视野造成了遮挡,当振镜顺时针逐渐偏转时,高速相机所捕获的反射画面越来越小,当达到一定偏转程度时,会影响对目标的捕获甚至导致画面丢失。为了避免上述两个极端情况,需要对该模型下的光路进行分析,计算有效跟踪范围。

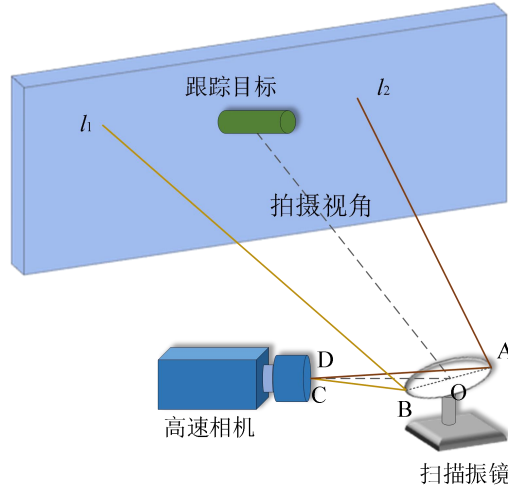


图 2-2 平行式系统结构模型

如图 2-2 所示，扫描振镜顺时针或逆时针偏转时均会存在有效拍摄的临界情况。当振镜逆时针（左）偏转至左侧反射线与相机相切于点 D 时，相机机身会对振镜的反射视野造成遮挡，为左临界角度，设此时的振镜偏转角为 θ_1 ，振镜反射面宽度 AB 为 $2d$ ，相机的光瞳到振镜中心的距离 CO 为 L ，以相机光轴 CO 所在的直线为基准， $\angle COB = \theta_1$ ，计算 θ_1 的大小。以 O 为坐标原点，CO 方向为 x 轴，在平面 ABC 内，以过点 O 与 CO 垂直沿 BA 方向为 y 轴，可以算出 C 点坐标为 $(-L, 0)$ ，B 点坐标为 $(-d \cos \theta_1, -d \sin \theta_1)$ 则直线 BC 的斜率 k_1 为 $-d \sin \theta_1 / (L - d \cos \theta_1)$ ，直线 BO 的斜率 k_2 为 $\tan \theta_1$ ，垂直于 BO 的法线斜率 $k_3 = -1 / \tan \theta_1$ 。 l_1 为入射光线，经镜面 B 点反射至 C 点，这代表振镜最左侧视场，当 l_1 与相机相切，切点为点 D 时，达到逆时针偏转的临界角度。相机镜头直径记为 $2r$ ，则 D 点坐标为 $(-L, r)$ 。此时，BC 与 l_1 关于法线对称，设 l_1 的斜率为 k_4 ，函数为 $y = k_4 x + b_1$ ，由对称关系可的 k_1 ， k_3 和 k_4 之间的关系式为：

$$\frac{k_3 - k_1}{1 + k_3 k_1} = \frac{k_4 - k_3}{1 + k_4 k_3} \quad (2-1)$$

将 k_1, k_3 的值代入式 2-1 可算出 k_4 的值，再代入 B 点坐标 $(-d \cos \theta_1, -d \sin \theta_1)$ 算出 b_1 得到 l_1 的直线方程，将 D 点 $(-L, r)$ 入 l_1 的直线方程，由此可计算出此时振镜的左临界偏转角 θ_1 。

另外，随着振镜不断顺时针（右）偏转，视场角 $\angle ACB$ 越来越小，相机所捕获的画面也越来越小，这对图像的后续分析带来了极大的不便与误差。为了保

证成像画面的质量，经多次观察实验，规定视场角 $\angle ACB$ 不得小于 30° 。设振镜偏转角为 θ_2 时达到右临界值，计算各项参数，A点坐标 $(d \cos \theta_2, d \sin \theta_2)$ ，B点坐标 $(-d \cos \theta_2, -d \sin \theta_2)$ ，C点坐标 $(-L, 0)$ 直线BC的斜率 k_1 为 $-d \sin \theta_2 / (L - d \cos \theta_2)$ ，直线AC的斜率 k_5 为 $d \sin \theta_2 / (L + d \cos \theta_2)$ ，故对于AC和BC所成角 $\angle ACB$ 有：

$$\tan \angle ACB = \frac{k_1 - k_5}{1 + k_1 k_5} \quad (2-2)$$

将 $\angle ACB=30^\circ$ 代入式 2-2 即可计算出 k_5 的值进而得到右临界角度 θ_2 的大小。综合上述计算，对于平行式光路结构系统，要想保证拍摄目标图像的效果，振镜的旋转角度需要控制在 $[\theta_1, \theta_2]$ 范围内。由此可以看出平行式光路结构存在相机机身的遮挡以及拍摄画面狭小问题，对实际拍摄测量带来了诸多不便。

为减小振镜旋转带来的影响，扩大拍摄视场，本文采用仰角式拍摄结构作为系统的拍摄方式。如图 2-3 所示，高速相机置于振镜的前方，呈一个向上的仰角对准振镜反射面。在这种光路结构下，只要设置一个合理的仰角，振镜在旋转过程中不会受到来自相机机身的遮挡。拍摄视场与相机到振镜的距离有关，两者距离越远所拍摄视场就越大，但此时成像的清晰度就会大大降低，图片中的目标也会减小，若距离近，此时成像清晰，目标明显，但是拍摄视场也会随之减小。因此，为了保证在拍摄视野不受相机遮挡的同时，也要保证成像的大小与清晰度，需要对合理的相机仰角以及相机与振镜之间的距离范围进行分析计算。

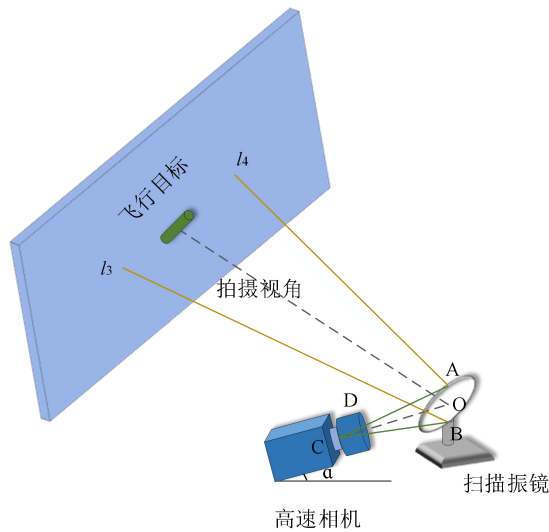


图 2-3 仰角式系统结构模型

如图 2-3 所示, 设相机的仰角为 α , 当 α 过小时, 相机边缘部分会与 l_3 相交于点 D, 此时同样会造成视野遮挡, 当 α 逐渐增大时, $\angle ACB$ 在随之减小, 代表相机所拍摄的画面减小。因此, 为避免视野遮挡和视野过小的问题, 仰角 α 的范围计算如下。

设振镜的中心 O 点为坐标原点, 垂直镜面方向为 x 轴, 以直线 AB 方向为 y 轴, A, B 两点分别位于振镜的上下边缘。设当仰角为 α_1 时, 反射视线 l_3 与相机机身相切于点 D, 此时相机光瞳到振镜中心的距离 CO 为 L, AB 距离为 2d, 相机中轴线与水平面的夹角为临界角度 α_1 。易求得点 A 的坐标 $(0, d)$, 点 B $(0, -d)$, 相机光瞳 $C(-L \cos \alpha_1, -L \sin \alpha_1)$, 得出直线 BC 的斜率 $k_6 = (L \sin \alpha_1 - d) / L \cos \alpha_1$, 设过 B 点振镜平面的法线为 $y = -d$, 直线 l_3 与 BC 关于法线对称, 由此计算出直线 BD 的斜率 $-k_6$ 和直线方程:

$$y = -k_6 x + b_2 \quad (2-3)$$

将 B 点坐标 $(0, -d)$ 代入式 2-3 可计算 b_2 的值, 已知相机机身高度为 W_c , 得出 D 点坐标 $(-L \cos \alpha_1 - W_c \sin \alpha_1, -L \sin \alpha_1 + W_c \cos \alpha_1)$, 代入式 2-3, 即可计算出此时的临界仰角 α_1 。

与平行式结构相似, 要想保证相机所拍摄画面的大小和质量, 需要视场角 $\angle ACB$ 不得小于 30° , 设此时的临界仰角为 α_2 , 由 A 点坐标 $(0, d)$, B 点坐标 $(0, -d)$ 和相机光瞳 $C(-L \cos \alpha_2, -L \sin \alpha_2)$ 可计算出直线 AC 的斜率 $k_7 = (d + L \sin \alpha_2) / L \cos \alpha_2$, 直线 BC 的斜率 $k_8 = (L \sin \alpha_2 - d) / L \cos \alpha_2$, $\angle ACB$ 为 AC 和 BC 的夹角, 得到关于 k_7, k_8 的关系式:

$$\tan \angle ACB = \frac{k_7 - k_8}{1 + k_7 k_8} \quad (2-4)$$

由式 2-4 代入 k_7, k_8 的表达式, 令 $\angle ACB = 30^\circ$, 得出此时的临界仰角 α_2 , 综合上述计算, 可得到仰角式光路结构相机的仰角范围在 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 之间, 此时, 无论振镜如何旋转, 相机都不会遮挡拍摄视野。

另外, 除了振镜的旋转角度和高速相机的俯仰角度对拍摄视野有影响外, 高速相机与目标之间的距离也有着重要的影响, 为了保证拍摄目标的大小和清晰度, 需要合理的设置相机镜头与振镜之间的距离关系。如图 2-4 所示:

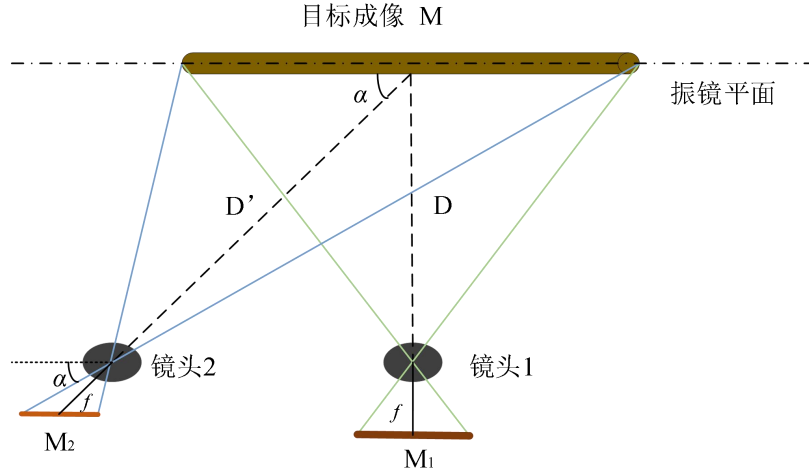


图 2-4 目标成像示意图

在图 2-4 中，令目标在振镜中的成像长为 M ，镜头与振镜平面距离为 D ，当存在仰角为 α 时， $D' = D / \sin \alpha$ ，两个不同位置的镜头成像分别为 M_1 和 M_2 ，镜头焦距为 f 。根据图中几何与数量关系可以计算出目标在两个镜头上的成像大小 M_1 和 M_2 。

$$M_1 = \frac{f}{D} \times M \quad (2-5)$$

$$M_2 = \frac{f}{D / \sin \alpha} \times M \quad (2-6)$$

设相机成像视场的长度为 P ，要使得目标成像清晰完整，在视场中不宜过大也不宜过小，目标过大会加大跟踪的难度，容易出现脱离视场的情况，目标过小则会导致目标不清晰，分析困难。所以，为了平衡跟踪与分析两者之间的效果，需要控制目标在成像视场中的长度比例高于成像视场的 $1/5$ ，低于成像视场的 $3/5$ 。所以，由式 2-5，2-6 计算出相机与振镜之间的距离 D 满足如下范围：

$$\frac{5fM \sin \alpha}{3P} \leq D \leq \frac{5fM \sin \alpha}{P} \quad (2-7)$$

根据以上计算的限定范围，研究通过 Matlab 进行仿真分析，比较了两种光路模型在不同参数环境下的跟踪范围，包括振镜宽度（ W ）、相机宽度（ W_c ）和相机光瞳到振镜中心的距离（ D ），当振镜平面与目标运动轨迹平行时，设此时的振镜旋转度数为 0 度。具体结果如表 2-1 所示：

表 2-1 不同光路结构振镜跟踪范围

系统结构参数（毫米）			平行式光路结构扫描振镜可	仰角式光路结构扫描振镜可跟
W	W _c	D	跟踪范围（度）	踪范围（度）
50	50	170	22.6~74.4	-33.0~33.0
30	50	170	20.3~71.8	-35.0~35.0
50	60	170	25.1~76.5	-32.0~32.0
50	40	170	21.7~72.6	-33.0~33.0
50	50	150	23.0~77.3	-31.5~31.5
50	50	190	22.8~73.1	-34.0~34.0

由表 2-1 可以明显看出仰角式结构在各种不同参数的环境下，可跟踪范围均优于平行式结构且仰角式可以跟踪负角度范围的目标，可以提供更为广泛全面的拍摄，所以确定了系统结构采用仰角式光路结构。

2.4 扫描振镜旋转模型设计

在设计完系统的光路结构后，对于振镜的选型和旋转模型的控制也是拍摄系统设计的核心部分，是保证目标成像质量的关键因素。首先对扫描振镜的基本原理进行介绍。扫描振镜是一种精密光学设备，通过旋转镜片来改变激光束或其他光源的方向，从而实现对目标区域的扫描，通常用于激光雕刻，激光切割等场景。本文系统利用镜片旋转改变相机拍摄视角，跟踪飞行目标。扫描振镜通常由电磁线圈驱动。线圈通电后会产生磁场，磁场作用下使得振镜上的反射镜（通常是轻质的镜片）发生旋转。振镜系统中一般包含位置传感器，例如光电编码器或位置检测器，用于实时反馈当前镜片的角度。该传感装置通过实时检测角度位移量并将其转化为电信号传输至控制单元，实现系统运行状态的闭环调节。反光镜片随振镜角位移变化动态调整光束入射路径，从而完成目标区域的光束扫描覆盖。现阶段主流的扫描驱动模式涵盖机械式、谐振式与检流计式等类型，其中与前两类扫描方式相比，本文采用灵敏度更高、跟踪范围更广、成本更低的检流计扫描方式。检流计扫描（Galvanometer Scanning）利用电磁感应原理控制光束位置，通

过在检流计线圈中施加电流，产生转动力使得反射镜旋转，从而精确控制相机视角的位置。闭环控制系统监测反射镜位置，实时调整电流以确保高精度定位和稳定性。扫描振镜一般通过电压的大小来实现对振镜旋转速度、角度的控制。通过调节施加在线圈上的电压，可以控制振镜的转动角度，不同的电压对应不同的转动角度。控制系统通过设定电压值来精确定位振镜的位置。振镜的模型与基本原理如图 2-5 所示：

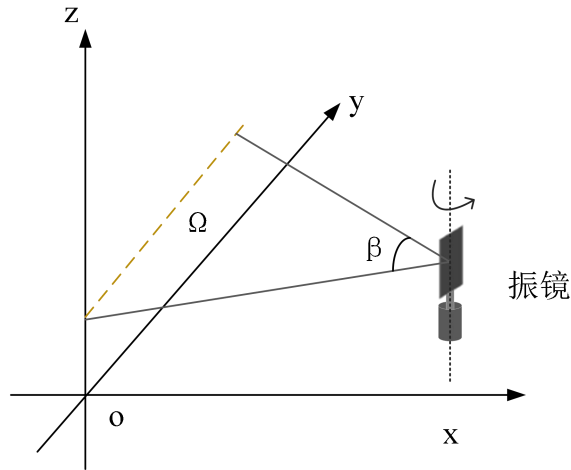


图 2-5 扫描振镜原理图

在图 2-5 中展现了三面振镜在不同位置上对不同维度的拍摄，振镜位置正对 y 轴平面，视野角度为 β ，此时的拍摄范围为 Ω ，随着振镜绕自身主轴旋转可跟踪拍摄在 z-y 平面内沿 y 轴方向运动的目标，同理，若拍摄 x-y 或 x-z 平面内的目标，可通过调整振镜的位置和角度来实现其他平面的拍摄。本文系统只用到了单面振镜辅助拍摄，实际可根据不同场景和不同需求使用双面或多面振镜组合对目标进行多维度拍摄分析。

扫描振镜的旋转角度受电压 V 控制，设其旋转角度为 w ，控制系数为 K ，则两者之间的关系式为：

$$w = KV \quad (2-8)$$

在跟踪过程中，通过控制系统电压的大小来调节振镜的旋转角度，从而改变拍摄视角。要想使得运动目标始终在相机中清晰成像且位于视场中央，就要保证振镜偏转的速度与目标运动速度一致，让相机的视角始终跟随运动目标。当飞行目标运动速度不同时，振镜的旋转速度，对应的偏转角度也随着改变，所以需要

计算不同目标的运动速度，找到振镜旋转与目标运动之间的关系，建立振镜旋转模型，再由系统控制输出电压，实现对不同运动速度目标的凝视跟踪。下面将借助振镜的跟踪示意图 2-6 推导目标速度 v 与振镜旋转角度 w 之间的关系，建立扫描振镜的旋转模型。

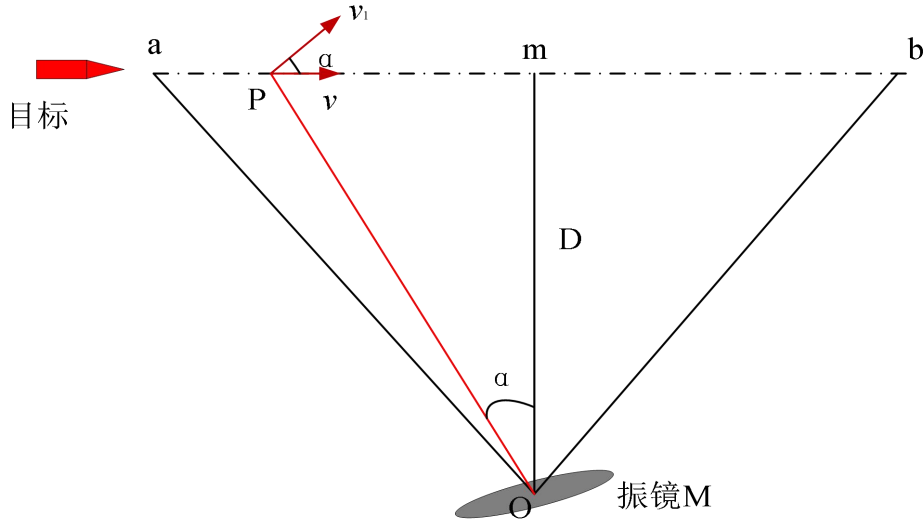


图 2-6 振镜跟踪示意图

由图 2-6，假设目标做近一维水平运动，当目标进入跟踪路段 ab 后，触发传感器传递控制信号，控制振镜开始跟随目标的移动而旋转，始终保证目标在相机的视野中央。如图所示， m 为跟踪段 ab 的中点， D 为振镜到中点的距离， α 为相机中心凝视线 OP 与中线 Om 的夹角， v_1 为中心凝视线的线速度， w_1 为中心凝视线的角速度，目标运动的位置为点 P ，计算振镜的运动参数，建立旋转模型。

建立振镜旋转模型的本质是计算振镜旋转角度 w 与目标速度 v 的关系，由图计算出振镜中心 O 到目标位置 P 点的距离 OP 为：

$$OP = D / \cos \alpha \quad (2-9)$$

由此，根据距离 OP 和中心凝视线的角速度 w_1 可以计算出此时中心凝视线的线速度 v_1 的大小：

$$v_1 = w_1 \cdot OP \quad (2-10)$$

为了保证目标时刻处于视野中央，获取清晰的目标图像，相机中心凝视线在目标运动轨迹上的速度分量必须与目标自身运动速度相等，由此可以得到：

$$v_1 = v \cdot \cos \alpha \quad (2-11)$$

联立公式 2-9, 2-10 和 2-11 可以得出此时相机中心凝视线角速度大小为:

$$w_1 = \frac{v \cdot \cos^2 \alpha}{D} \quad (2-12)$$

在计算出中心凝视线与目标速度的关系后, 由下图 2-7 继续分析振镜旋转角度 w 与目标速度之间的关系。

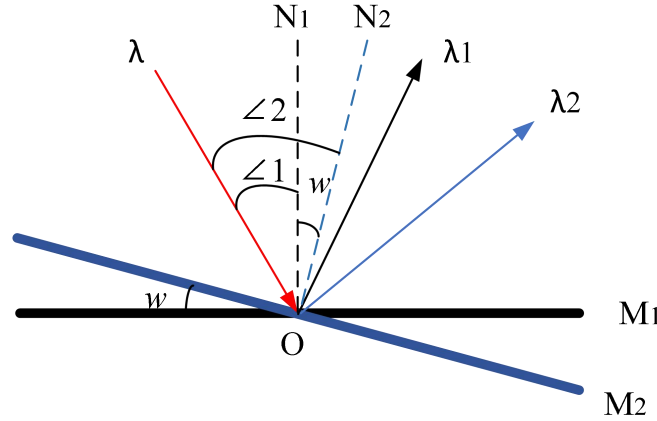


图 2-7 扫描振镜旋转光路示意图

如图 2-7 所示, M_1 为振镜初始平面, N_1 为此时振镜平面的法线, 入射光线 λ 经 M_1 平面反射, 此时反射光线为 λ_1 , 入射角为 $\angle 1$ 。由于反射角等于入射角, 所以此时 $\angle \lambda O \lambda_1 = 2\angle 1$ 。当振镜顺时针旋转固定角度 w , 得到新的振镜平面 M_2 , 此时的法线为 N_2 , 入射光仍为 λ , 经 M_2 平面反射, 此时的反射光线为 λ_2 , 入射角为 $\angle 2$, 同理, 此时 $\angle \lambda O \lambda_2 = 2\angle 2$ 。又因为 $\angle 2 = \angle 1 + w$, 可得出:

$$\angle \lambda O \lambda_2 = 2(\angle 1 + w) \quad (2-13)$$

将 $\angle \lambda O \lambda_2$ 与 $\angle \lambda O \lambda_1$ 做差得出:

$$\angle \lambda O \lambda_2 - \angle \lambda O \lambda_1 = 2w \quad (2-14)$$

由此, 可以得出结论, 当扫描振镜旋转了 w , 入射光与反射光的夹角增加了 $2w$, 也就是高速相机中心凝视线的旋转角度 w_1 是扫描振镜旋转角度 w 的二倍, 结合式 2-12 与 2-14 得出扫描振镜的旋转角度 w 可表示为:

$$w = w_1 / 2 = \frac{v \cdot \cos^2 \alpha}{2D} \quad (2-15)$$

为进一步明确振镜旋转与目标运动之间的线性关系，研究通过 Matlab 根据式 2-15 进行仿真分析并绘制了两者之间的关系曲线。假设目标运动以 50m/s 做匀速直线运动，忽略空气阻力和重力加速度，振镜与目标运动轨迹之间的距离为 10m，扫描振镜在 $[-25^\circ, 25^\circ]$ 范围内旋转，得到振镜旋转角速度与目标运动之间的关系如图 2-8 所示：

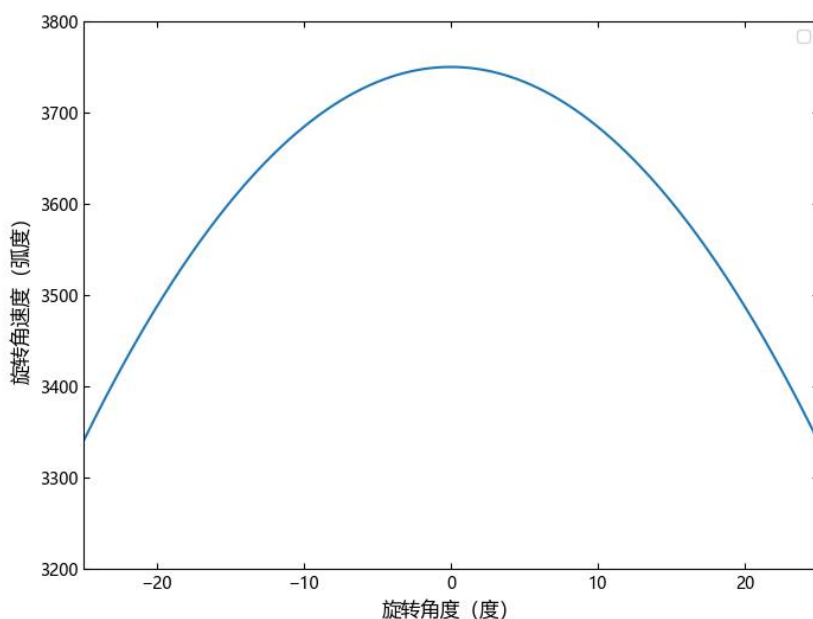


图 2-8 扫描振镜旋转变化曲线

由图 2-8 可以看出，当振镜旋转角度为 0 度时，此时目标离振镜的距离最小，振镜的角速度达到峰值，振镜旋转角度处于临界值时，目标离振镜距离最大，此时振镜的旋转角速度最小。在实际拍摄中，应当针对具体的实验环境和目标速度对系统器件的摆放进行合理的规划调整，力求达到最佳的跟踪拍摄效果。

2.5 本章小结

本章主要从高速飞行目标测量系统总体结构及原理、系统的光路结构设计和振镜的旋转模型建立三个方面分析，并开展了仿真实验。系统首先通过激光测速部分测得待测目标的运动速度，再由控制模块进行分析建立振镜的旋转模型，通过振镜的旋转改变高速相机的拍摄范围，保证目标在运动过程中始终在拍摄视野

的中央，获取目标运动过程中高质量的图像序列，为后续的计算分析提供基础。为了保证系统拥有较大的拍摄范围，需要设计合理的系统光路结构，本研究分析并比较了平行式光路结构和仰角式光路结构，通过理论推导和仿真实验证明仰角式光路结构受外界影响更小，具有更广泛的拍摄范围，确定仰角式为本系统的拍摄光路结构。在实际拍摄测量中，由于待测目标速度不相同，所对应振镜的旋转模型也就不同，为此，推导了振镜旋转角度与目标速度的数量关系，建立了振镜旋转曲线模型，提高了该系统测量的精确性和适用性。

通过仿真实验验证了本文所提出的测量系统的实用性，为后文飞行目标线性速度和滚转速度的计算提供了拍摄条件。

第 3 章 基于特征点三维重构的飞行目标线性速度测量方法研究

3.1 本章引言

在成功搭建完高速飞行目标测量系统后，需要对目标进行运动参数的测量。由于本文测量系统利用了振镜与单相机的组合结构，目标与虚拟相机的位置时刻变化，基于立体视觉的传统特征点匹配方法无法适用。所以，本章针对振镜拍摄系统的特殊性，结合目标近一维运动以及相机拍摄的特点，设计了一种利用背景建立单应矩阵，计算目标特征点的虚拟视差图，对目标进行特征点三维重构，再通过标定数据计算出目标在世界坐标系下的真实坐标，得出目标实际位移量，最后结合相机实际帧率得出目标线性速度的方法。本章内容主要包括介绍视觉测量的原理以及标定方法、特征点的提取匹配技术分析和特征点三维重构的方法研究。

3.2 视觉测量与标定原理

3.2.1 成像原理与标定

由于本文是基于机器视觉的方法对目标运动参数进行测量计算，机器视觉的核心是相机成像，而相机成像的核心则是四个坐标系之间的转换，分别为世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系。下面介绍四者之间的关系和转换原理。

如图 3-1 所示呈现了四个坐标系转换关系的模型，从中可以更加清楚的理解相机成像的原理。

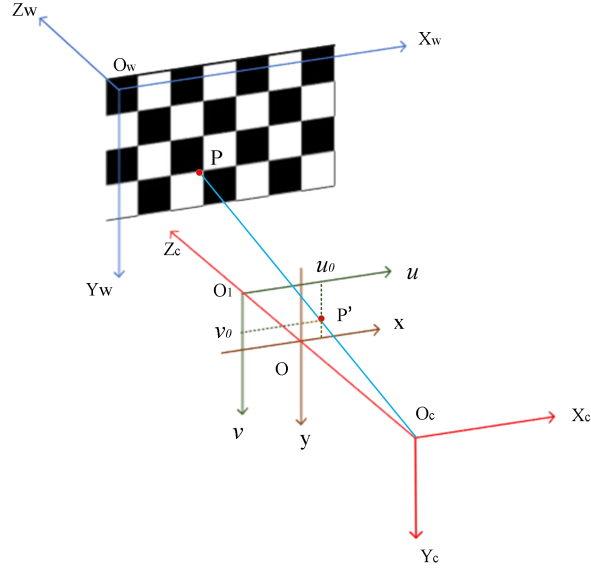


图 3-1 相机成像坐标系转换模型

图 3-1 中清楚的展示了四个坐标系之间的转换模型，该模型基于经典的针孔成像，满足目标点、成像点和相机光心点三点共线，假设目标为点 P ，通过相机成像模型建立目标与像之间的对应关系和坐标系之间的转换关系。

世界坐标系：如图 3-1 中的 $O_w-X_wY_wZ_w$ 表示世界坐标系，可视为一个独立的虚拟坐标系，用来描述拍摄场景内的各个物体或者点的位置和姿态。空间中任意一点 P 在世界坐标系中可表示为 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 。

相机坐标系：相机坐标系是指以相机为中心的坐标系，用来描述相机内部的物理结构和成像原理。相机坐标系的原点通常位于相机的光学中心或者图像传感器的中心点，其坐标轴与相机的光学轴重合。如图 3-1 中的 $O_c-X_cY_cZ_c$ 表示为相机坐标系。

图像坐标系：图像坐标系以相机主光轴和图像平面的交点 o 为原点，用于表示目标投影到图像平面上的点在一个标准化的空间中的位置，图 3-1 中用 $O-xy$ 表示，目标点 P 可投影致图像坐标系 $P'(x_0, y_0, 0)$ 。

像素坐标系：像素坐标系是指实际图像中像素的坐标系统。通常以图像的左上角为原点 O_1 ，图 3-1 中以 O_1-uv 表示。用于表示实际图像中每个像素的位置以及灰度信息，目标 P 在图像中的像素位置可表示为 (u_0, v_0) 。

以上为四个坐标系的介绍和转换关系，在实际测量中，往往需要测量目标的实际深度、姿态以及速度等参数，上述介绍了相机成像中的四个坐标系，但是相

机的内部和外部参数不相同，造成坐标系的单位尺度也不同，需要对相机进行标定处理，计算坐标系之间的换算尺度，以便于准确地将世界坐标系中的点映射到图像像素坐标系中。经过分析比对，本文采用基于张正友标定^[72]的标定方法对本文的振镜系统进行内外参标定，计算出相机的内部参数、单应矩阵 H 和外参矩阵 $[R, T]$ ，为后文的特征点三维重构做标定准备。

3.2.2 立体视觉成像

上一小节分析了相机的成像坐标系说明了系统的标定方法，然而在实际的拍摄测量中，不是对目标进行简单的拍摄，而是对目标的二维图像序列分析，对其进行三维重构，计算其运动学参数。例如在测量目标线性速度时，就需要将二维图像坐标点重构为三维的世界坐标点。传统方法是由双目相机系统完成，两台相机共同拍摄同一目标，得到同一空间、时间下拍摄的对应目标点在两个像素坐标系下的坐标，进而对其三角化处理得到该目标点的三维坐标。目标点的三角化原理如图 3-2 所示：

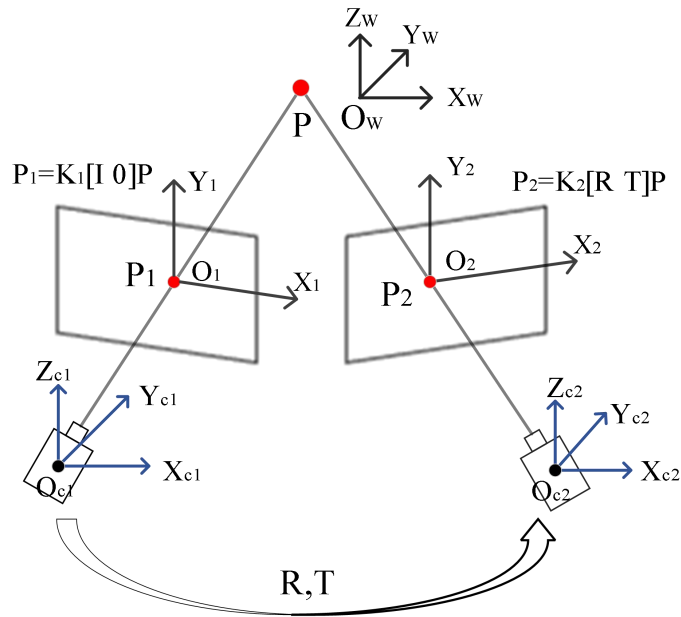


图 3-2 目标点三角化原理图

图 3-2 中目标点 P 位于世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 内，相机 O_{c1} 与 O_{c2} 分别在不同的位置进行拍摄，在对应的图像坐标 $O_1-X_1Y_1$ 和 $O_2-X_2Y_2$ 上，设点 $P(X, Y, Z)$ ，对应点的三维坐标为 $P_1(u, v, 1)$ ， $P_2(u', v', 1)$ 。通过标定得到相机的内参矩阵 K 和外参矩阵 $[R, T]$ 。首先，建立目标点 P 到 P_1 和 P_2 的映射关系：

$$\begin{cases} P_1 = K[I \ 0]P = NP \\ P_2 = K[R_2 \ T_2] = N'P \end{cases} \quad (3-1)$$

式(3-1)中说明了目标点 P 与对应图像坐标点之间的映射关系, 其中 K 表示标定得到的相机内参矩阵, 相机 O_{c1} 的旋转平移矩阵 $[I \ 0]$ 由单位矩阵和零矩阵构成, 相机 O_{c2} 的旋转平移矩阵 $[R_2 \ T_2]$ 由两个虚拟相机之间的旋转平移矩阵构成, N 和 N' 分别表示虚拟相机 O_{c1} 与 O_{c2} 的投影矩阵, 由标定的内参和外参矩阵共同构成。记投影矩阵 N, N' 为:

$$\begin{cases} N = K[I \ 0] = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \\ N' = K[R_2 \ T_2] = \begin{bmatrix} n'_1 \\ n'_2 \\ n'_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3-2)$$

根据式(3-1), (3-2)可以推出目标点 P 在虚拟相机上的投影点满足以下关系:

$$\begin{bmatrix} u_1 n_3 - n_1 \\ v_1 n_3 - n_2 \\ u'_1 n'_3 - n'_1 \\ v'_1 n'_3 - n'_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3-3)$$

在已知目标点 P 在两个虚拟相机的投影点 P_1, P_2 坐标的条件下, 对相机进行标定, 得到其内参矩阵 K , 外参矩阵 $[R_2, T_2]$, 综合上述公式(3-1)、(3-2)、(3-3)可以计算出图 3-2 中的目标点 P 的三维坐标。

3.3 特征点的提取与匹配技术

本文测量目标线性速度方法的核心是找到虚拟相机之间的单应矩阵, 对目标的特征点进行三维重构。由于目标是时刻运动的, 虚拟相机在各个时刻的位置都不同, 所以无法直接从目标特征点上计算单应矩阵。为解决这一问题, 本文考虑提取背景中的特征点进行匹配, 计算虚拟相机之间的单应矩阵。SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 特征点匹配法在应对光照、视角以及噪声变化的场景下具有良好的鲁棒性, 且具有尺度、旋转不变性的优势, 所以本文利用 SIFT 法对背景特征点进行提取和匹配。

3.3.1 SIFT 基本原理

由于 SIFT 特征点匹配方法的各项优势明显，该方法成为目前最热门的图像提取与匹配的方法，是公认的检测效果最佳的方法。SIFT 的处理流程如图 3-3 所示：

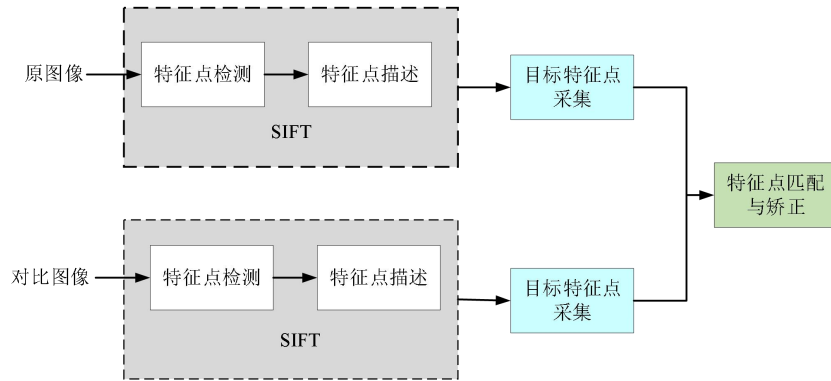


图 3-3 SIFT 算法流程图

将两张图片分为原图与对比图，对其分别进行特征点检测与提取，这一环节使用尺度空间中的极值点（关键点），这些点通过高斯差分空间（DoG Difference of Gaussians）检测出来。DoG 对不同尺度下的高斯平滑图像进行相减，以便在图像中检测到局部的极值点，这些点被认为是稳定的特征点。特征点描述过程中，需针对各关键点构建表征其局部梯度特性的数学描述。具体实施时，通过分析特征区域邻域内的梯度方向分布特征与强度变化模式，构造出以 128 维向量形式表达的特征描述子。在完成特征点提取与描述后，实施特征点对应关系建立，通常采用多维特征空间中的相似度评估方法，通过计算描述向量间的空间差异进行相似性判别，主要技术手段包括欧氏距离测度或归一化相关分析等量化指标。匹配时，会找到一个描述符的最佳邻居和次佳邻居，然后根据这些邻居的距离比例来进行筛选，以确保匹配的唯一性和准确性。

对于特征点提取与匹配步骤可主要分为以下三点：

- 1.建立多尺度空间：在特征提取过程中，SIFT 方法构建多尺度表示空间，保证特征点的尺度适应性。该方法采用高斯差分（Difference of Gaussian, DoG）运算代替传统的高斯滤波来构建尺度空间。这种处理增强了特征检测的尺度鲁棒性，使关键特征在不同分辨率下的数学表达保持稳定。该机制保证了跨尺度特征检测和描述的有效性。

- 2.特征点的定位：在 SIFT 算法中，特征点定位包含初始检测和精确检测两

个阶段。初始检测阶段通过在预先建立的尺度空间中比较每个像素与其邻域像素之间的灰度差异来识别待检测关键点的位置，有效地检测跨尺度的局部极值；然后，对待测关键点的位置和尺度进行精确细化，并在构造的尺度空间内进行二次插值以达到亚像素精度，而在原始图像中进行局部区域拟合或插值以确保关键点精确空间的确定。这样的检测过程保证了特征定位的鲁棒性，同时具有尺度不变性和较高的几何精度。

3.特征点描述与匹配：在特征描述阶段，SIFT 算法基于已解析的关键点几何参数（位置坐标与尺度因子），在特征邻域内构建表征局部纹理特性的数学模型。该过程通过对关键点邻域梯度分布进行统计直方图量化，形成具有旋转不变性的多维特征向量。特征匹配环节采用特征空间距离评估机制，典型实施方案为最邻近匹配准则，即通过计算特征向量间的欧式空间距离，在目标图像集中检索对应特征，进而建立跨图像的稳定特征对应关系。

3.3.2 SIFT 算法核心步骤

在上一小节，将 SIFT 特征提取匹配主要分为了 3 个核心步骤。首阶段通过构建高斯差分（DoG）空间实现多尺度特征检测，该空间由高斯核函数的多尺度卷积结果差分运算构成。这种尺度空间建模方法相较于常规高斯尺度空间，在保持特征点尺度不变特性的同时，显著增强了边缘特征响应强度，为后续精确提取特征点的空间坐标与尺度参数提供了数学基础。其核心机理在于利用高斯差分操作对图像边缘特征的增强效应，有效提升跨尺度特征检测的稳定性。

（1）首先进行高斯模糊处理，原始图像经过一系列不同方差的高斯核进行平滑处理，得到一系列具有不同平滑程度的图像。高斯核的方差决定了平滑的程度，而平滑后的图像在某种程度上类似于从一个尺度到下一个尺度的过渡。下一步是进行采样，每个平滑后的图像进行下采样（或者上采样），即将图像的分辨率降低（或增加）。下采样可以通过减小图像尺寸来模拟目标在更远距离观察时的外观，而上采样则可以用于处理较小尺度的特征。接着需要构建图像金字塔，将每一组不同尺度的图像堆叠在一起，形成图像金字塔。这些图像按照尺度顺序排列，每层图像都比前一层更模糊（或更粗略），同时分辨率降低。金字塔的底层对应于原始图像，而顶层对应于最模糊的图像。最后进行特征点检测，在每个尺度空间中，使用特定的 DoG 算法来检测图像中的关键特征点。DoG 算法会比

较每一层与相邻层之间的高斯模糊差异，从而找到局部极值点，这些点被认为是具有良好尺度不变性的候选特征点。如图 3-4 所示，说明了 DoG 的构建过程。

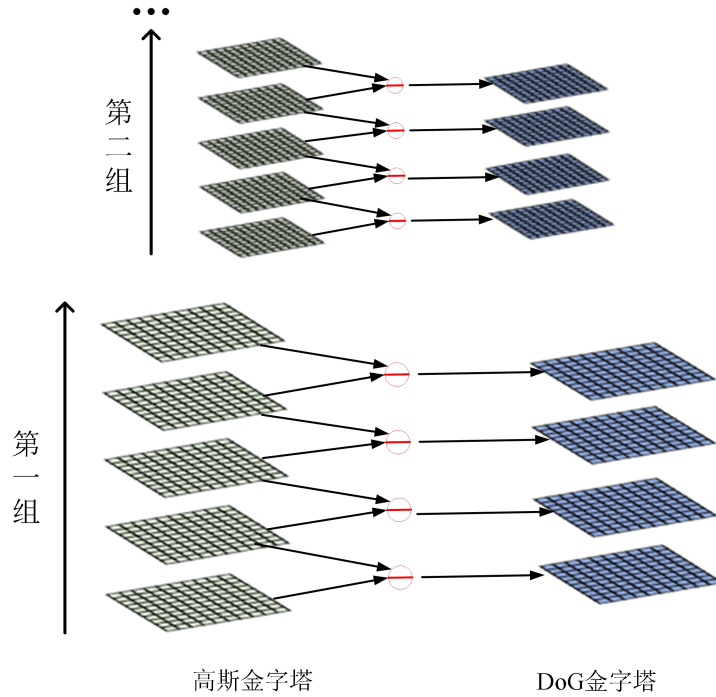


图 3-4 DoG 的建立示意图

如图 3-4 所示，DoD 金字塔的构建以高斯金字塔为数学基础。该过程通过对各分组内相邻尺度层实施高斯模糊参数差异化的图像进行差分运算，逐层生成对应的差分图像集合，最终通过逐层差分运算累积形成 DoD 金字塔结构。

(2) 在完成 DoD 空间建模后，特征点检测进入几何参数解算阶段，主要包含两个递进环节：首阶段通过尺度空间极值搜索实现特征点粗定位，该过程采用三维邻域极值筛选机制（即非极大值抑制算法）；次阶段则通过三维二次函数拟合对候选点进行亚像素级坐标精修，同时结合对比度阈值与边缘响应消除伪特征点。首先设定一个检测的阈值，用于排除尺度空间内像素值过低的点，这些过低的像素点不具备成为特征点的条件，接着在剩下的每个像素点的周围进行检索。具体检测形式如图 3-5 所示：

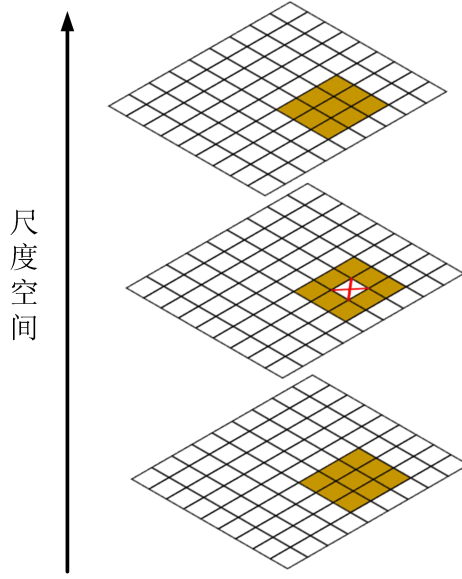


图 3-5 尺度空间中极值点搜索模型

如图 3-5 所示，起始层中的待检测像素点周围形成一个 $3 \times 3 \times 3$ 的立方体，在这 27 个像素点中，如果待检测像素点在尺度空间内的像素值大于周围其他的 26 个像素点，那么 SIFT 算法将其初步判定为极值点。每一层检测完成时，再将该层的相邻层作为起始层继续进行检索，以此类推直到所有像素点检测完毕。在这一步骤中，由于第一层和最后一层只有一个相邻的像素层，所以这两层不进行极值点检索。

(3) 在特征点初步检测完成后，由于该步骤是在离散空间中利用不断的隔点降采样检测特征点，这些点整合到连续空间中可能并不是特征点，所以还需要继续进行特征点精确定位。在特征点精确定位环节，SIFT 算法采用三维二次曲面数学模型对高斯差分 (DoG) 函数进行数学逼近。该方法通过对尺度空间响应函数实施曲面拟合运算，优化特征点的亚像素级空间坐标与最佳尺度参数，有效提升特征检测的几何精度，同时抑制因离散采样导致的定位偏差。这种基于连续函数近似的定位策略，使特征点的空间位置解算误差控制在 0.5 像素阈值范围内，显著增强了特征表征的稳定性。接着对任意特征点进行二阶 Taylor 展开省略高阶项得到拟合函数：

$$D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{X^T}{2} \times \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X \quad (3-4)$$

其中， $X = (x, y, \sigma)^T$ ，表示所提取特征点 X 的三维信息，横坐标 x ，纵坐标 y ，

以及空间尺度信息 σ 。对式(3-4)进行求导并令结果为零可求得极值点的偏移量 X' ：

$$X' = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial X^2} \frac{\partial D}{\partial X} \quad (3-5)$$

结合上式，可以得到对于特征点方程的表达式为：

$$D(X') = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial X} X' \quad (3-6)$$

在得到的亚像素精度级的图像特征点三维信息后，通过对比插值中的偏移量程度来对极值点进行筛选，最终确定特征点的精确信息。

(4) 在完成特征点精确定位后，SIFT 算法进入特征匹配阶段。该过程通过构建特征描述子实现匹配功能，具体步骤为：基于特征点的几何参数（空间坐标与主方向），在其邻域范围内计算梯度分布特性，生成表征局部纹理特征的 128 维描述向量。特征匹配时，采用描述向量间的欧氏距离作为相似性判据，通过最近邻搜索策略建立特征点间的对应关系。记模板图的关键点描述子为 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{i128})$ ，对比图的关键点描述子为 $Q_i = (Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{i128})$ 。任意两个描述子的相似度量计算式：

$$d(P_i, Q_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{128} (p_{ij} - q_{ij})^2} \quad (3-7)$$

匹配过程通常采用 kd 树（平衡二叉树）的数据结构搜索方式完成，搜索内容是以目标图像的特征点为基准，搜索原图像中与其最临近特征点以及次临近特征点的位置。两匹配成功的描述子之间的相关量 $d(P_i, Q_i)$ 需要满足式（3-8）：

$$\frac{\text{对比图中距离 } P_i \text{ 最近的点 } Q_j}{\text{对比图中距离 } P_i \text{ 的次最近点 } Q_k} < \text{Threshold} \quad (3-8)$$

另外，在特征点匹配的过程中，往往会存在异常点导致匹配错误，降低匹配的精确度。对此，本研究采用 RANSAC 对异常点进行消除。RANSAC（随机采样一致性）通过迭代随机采样和模型验证去除异常点：首先随机选取少量匹配点对计算几何模型，随后根据该模型计算所有匹配点的误差，将误差小于阈值的点判定为“内点”，其余视为“异常点”；重复这一过程多次，选择内点最多的模型作为最终结果，并剔除对应的外点。该方法通过统计鲁棒性过滤误匹配，提升

特征匹配的准确性。

3.4 特征点三维重构与线性速度的计算

上一节中分析了特征点的提取与匹配技术,为本节的特征点重构提供了技术前提。特征点三维重构是本文计算飞行目标线性速度的核心步骤,由于本文利用振镜拍摄系统作为整体结构,传统的多目重构法和移动单目重构法无法适用,因此利用静态背景中的特征点提出对虚拟相机之间进行单应矩阵重构的方法从而完成对目标特征点的三维重构。

3.4.1 特征点三维重构

在本章的第一节中介绍了立体视觉的原理,在目标点三角化的过程中需要两台相机对目标进行成像,相机的内参矩阵和相机之间的外参矩阵。在对运动目标进行三维重建时,也可以使用移动单相机,通过结构光流技术对目标三维重建。运动恢复结构技术^[73] (Structure-from-Motion, SFM) 作为经典的三维重建方法,能够基于时序图像采集数据实现目标物体的三维空间拓扑重建。该技术通过分析运动目标在连续帧间的几何投影关系,解算目标物体的空间位姿参数并生成离散三维点云模型,在增强现实系统、自动驾驶环境感知及三维地图重建等方向具有重要工程应用价值。如图 3-6 为 SFM 算法的具体流程。

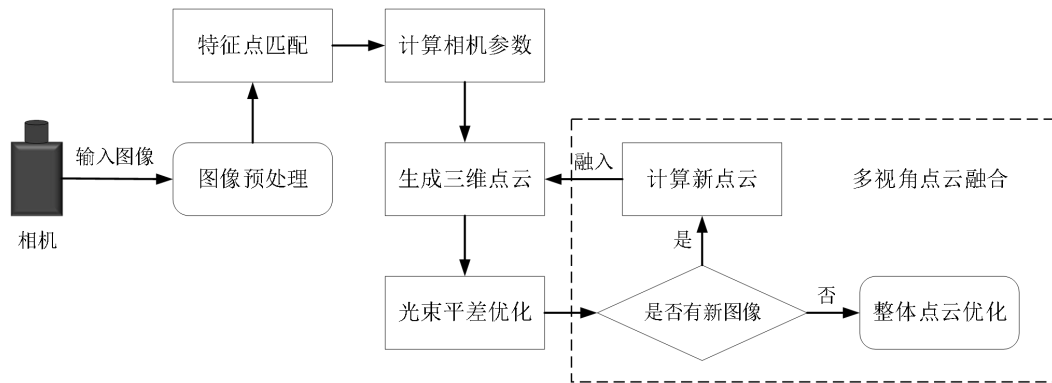


图 3-6 SFM 算法流程

如图,利用相机捕获目标的图像序列,经图像预处理后进行特征点匹配和计算相机的矩阵参数。再结合特征点和相机参数利用三角测量法恢复特征点的三维坐标从而生成三维点云,然后再利用光束平差优化对点云进行多视角优化融合在,最终形成目标整体的三维点云。然而,本文的拍摄系统为单目相机加振镜的组合,并不存在两个或多个实体相机,而是通过一系列的虚拟相机拍摄,形成目

标的运动图像序列，如图 3-7 所示。

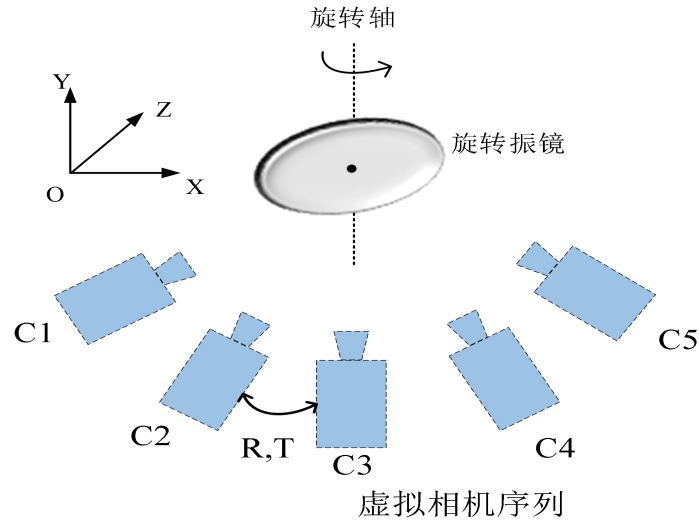


图 3-7 虚拟相机位姿变换示意图

这样的拍摄系统无法直接获取目标在两个相机视角下的投影点和相机之间的外参矩阵，就无法利用三角化的关系建立三维点。因此，本文针对该振镜拍摄系统以及运动目标图像序列的特点，改进了传统的特征点重构方法，将图像序列中目标以及背景中的特征点分别进行匹配，利用背景特征点建立单应矩阵，再进一步计算虚拟相机间的位姿关系以及目标在虚拟相机上的投影点，从而完成特征点三维重构。

3.4.2 重构单应矩阵法

在上一小节中提出了针对本文系统的特征点重构法，利用两帧图像的背景信息中的特征点计算单应矩阵，在结合相机参数重构虚拟相机之间的外参矩阵，从而对目标点实现三维重构，将此称之为重构单应矩阵法。如图 3-8 所示，分别在虚拟相机 O_{c1} 和 O_{c2} 处选取两帧图像进行分析。

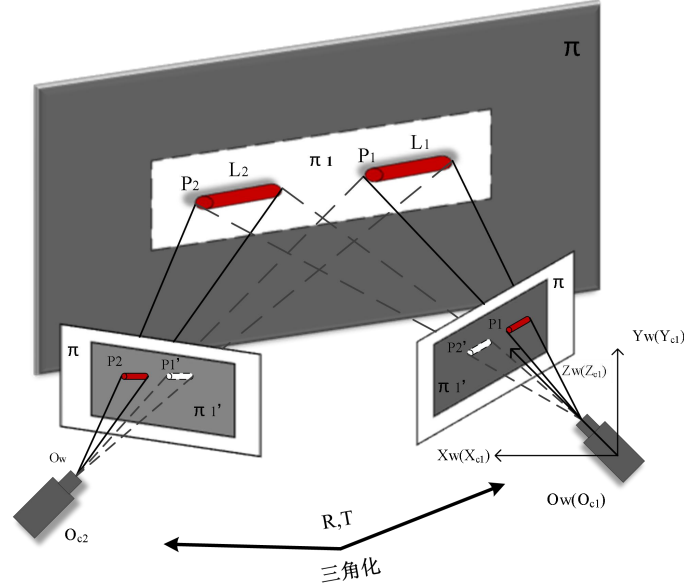


图 3-8 飞行目标投影模型

如图所示，令虚拟相机 O_{c1} 的坐标系 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 与世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 重合，高速飞行目标从 L_1 位置运动到 L_2 位置，目标上的特征点 P 从 P_1 位置运动到 P_2 位置，虚拟相机之间的旋转矩阵为 R ，平移矩阵为 T ，目标点在两个虚拟相机上的投影 p_1 和 p_2 。由于目标自身的运动，虚拟相机之间的参数 R ， t 无法直接用于目标位置的变换，即：

$$P_1 \neq R \cdot P_2 + t \quad (3-9)$$

因此，不可将 p_1 和 p_2 当作同一个目标点在两台相机上的投影，无法直接进行三角化求解 P 的三维坐标。需要计算出 p_1 和 p_2 分别在虚拟相机 O_{c1} 和 O_{c2} 上对应的虚拟投影点 p_1' 和 p_2' 才能确定目标点的三维坐标。

在飞行目标的拍摄过程中，由于目标表面的场景深度远小于相机距目标的实际距离，且运动深度几乎不变，所以可将目标的运动过程视为发生在同一个二维平面内，设该平面为 π_1 ，此时同一平面的三维点在不同位置下的投影点坐标可记为 $P(u,v,1)$ ， $P'(u',v',1)$ ，并满足如下关系：

$$p = Hp' \quad (3-10)$$

上式中， H 为单应矩阵，用于约束同一平面上三维目标点在两个像素平面上的二维投影点的坐标关系，两个对应的二维投影点可通过单应矩阵 H 进行相互转换， H 可记为：

$$H = K(R - \frac{n^T t}{d})K^{-1} \quad (3-11)$$

在式（3-11）中， K 代表相机内参矩阵， R ， t 代表相机的旋转平移矩阵， n^T 代表目标所在平面的法向量， d 代表坐标系原点到目标所在平面的距离。设虚拟相机间的单应矩阵为 H_0 ，通过式 3-11 求出 H_0 ，便可以计算出 p_1 ， p_2 的虚拟对应点 p_1' ， p_2' 。具体计算流程如图 3-9 所示：

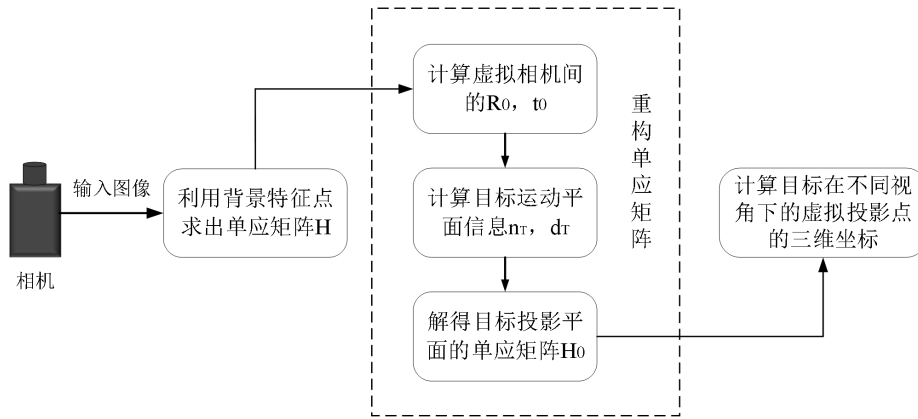


图 3-9 虚拟对应点三维坐标计算流程图

重构单应矩阵主要分为三个核心步骤，第一步是计算虚拟相机间的外部参数 R_0 和 t_0 ，该参数可通过由 Faugeras^[74]所提出的单应矩阵分解方法分解得出。对于单应矩阵 H ，本文利用背景信息中的特征点进行计算。

首先选取相机拍摄的图像序列中几组背景特征点进行特征匹配，利用本章第二节介绍的 SIFT 算法进行特征点匹配。对于选取的背景特征点不一定都位于同一平面，投影点的坐标关系不满足式（3-10），此时可以借助基础矩阵 F 求解单应矩阵 H 。设虚拟相机中一组对应投影点为 x ， x' ，并且满足如下关系：

$$x'^T F x = 0 \quad (3-12)$$

其中， F 可表示为：

$$F = K^{-T} t_x R K^{-1} \quad (3-13)$$

其中， K 为相机的内参矩阵，可通过标定获取。 R 和 t 分别为虚拟相机之间的旋转，平移矩阵。 F 是一个秩为 2 的 3×3 矩阵，可记为：

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

综合上式，对于虚拟相机的一组坐标为 $x(u, v, 1)$ ， $x'(u', v', 1)$ 的投影点，可得下式关系：

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3-15)$$

对式（3-15）化简整理可得：

$$uu'f_{11} + uv'f_{12} + uf_{13} + vu'f_{21} + vv'f_{22} + vf_{23} + u'f_{31} + v'f_{32} + f_{33} = 0 \quad (3-16)$$

通过式（3-16），结合图中 8 组对应特征点，可以得到包含 8 个方程的线性方程组，解出该方程组得到基础矩阵 F ，再对该矩阵进行分解得出虚拟相机之间的外参矩阵 R_0 和 t_0 。

当选取的背景特征点位于同一平面，投影点的三维坐标满足式（3-10），式中的 H 代表两个投影点对应平面之间的映射关系， H 记为：

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

所以，综合式（3-10）和（3-17），对于虚拟相机的一组坐标为 $x(u, v, 1)$ ， $x'(u', v', 1)$ 的投影点，可的如下关系：

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-18)$$

将式（3-18）展开并化简可得到关于 u', v' 的表达式：

$$\begin{aligned} u' &= h_1u + h_2v + h_3 - h_7uu' - h_8vv' \\ v' &= h_4u + h_5v + h_6 - h_7uv' - h_8vv' \end{aligned} \quad (3-19)$$

由上式（3-19）可知，一组对应的特征点可以建立两个参数方程，选取 4 组对应特征点便可建立 8 个参数方程用于求解单应矩阵 H ，最后对 H 进行矩阵分解可得到虚拟相机之间的外参矩阵 R_0 和 t_0 。

在得到虚拟相机之间的外参矩阵之后，需要计算目标运动平面的参数信息。

当选取的目标点均位于同一平面时，相机投影平面间的单应矩阵可由式（3-11）求得。对于运动平面 π 的单位法向量 $\mathbf{n}_0^T$ 和该平面到世界坐标系原点的距离 d_0 这两个参数不随目标的移动而发生变化，所以可直接选取目标区域上的特征点进行匹配，计算其单应矩阵，分解可得到目标所在平面的运动参数 $\mathbf{n}_0^T$ 和 d_0 。最后结合式（3-11）和两个运动参数可组合成新的单应矩阵 H_0 作为目标投影平面的单应矩阵：

$$H_0 = K(R_0 - \frac{\mathbf{n}_0^T \mathbf{t}_0}{d_0})K^{-1} \quad (3-20)$$

3.4.3 飞行目标线性速度计算

上一小节中，得到了目标投影平面的单应矩阵 H_0 ，在已知任意特征点 P_1 在虚拟相机 O_{c1} 上投影坐标 p_1 ，可利用该矩阵计算出在虚拟相机 O_{c2} 上的对应投影点 p_1' 的坐标：

$$p_1' = H_0 p_1 \quad (3-21)$$

同理，对于特征点 P_2 同样利用单应矩阵 H_0 构建投影点 p_2 和 p_2' 的关系：

$$p_2' = H_0 p_2 \quad (3-22)$$

通过以上计算，得到了目标特征点 P 在不同位置下的两组对应虚拟投影点 p_1, p_1', p_2, p_2' 。根据 3.2.2 小节提到的三角化原理结合相机的内参矩阵和虚拟相机直接的外参矩阵，可以重构出在不同位置下的目标特征点实际三维坐标 $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2)$ 。但是这些三维坐标仅仅只是在已经建立的世界坐标系下的参考坐标，不具备实际意义，要想得到特征点的实际距离还需要计算尺度因子 S 。我们利用特征点的参考坐标距离 d_1 和测量的实际距离 d_2 的比值计算尺度因子，参考坐标之间的距离用到了两点之间的距离公式，如式（3-23）所示：

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (3-23)$$

将参考坐标的距离 d_1 与测量的特征点之间实际距离 d_2 相比可得到尺度因子 S ：

$$S = \frac{d_1}{d_2} \quad (3-24)$$

为了减小误差，计算采用 n 个特征点距离的平均值作为目标的实际位移 d' ，

计算方法如下：

$$d' = \frac{S}{n} \sum_{i=0}^n d_i \quad (3-25)$$

最后，通过设置相机的帧率控制每帧图像之间的时间间隔 t ，结合式(3-25)计算的目标实际位移 d' ，选取两张间隔为 m 帧的图像计算，则目标的飞行线性速度(m/s)可以表示为：

$$v = \frac{d'}{mt} \quad (3-26)$$

3.5 本章小结

本章主要完成了对飞行目标特征点的提取以及线性速度的计算。首先对视觉成像的原理和坐标系的转换进行了介绍，说明了三角化的原理。接着介绍了 SIFT 目标提取的算法，利用该算法对待测目标上的特征点进行提取与匹配，为后续目标线性速度测量提供基础。本文所采用的由单目相机与旋转振镜组合而成的视觉测量系统，由于虚拟相机和目标自身的位置均在不断运动，传统的视觉成像方法不能够完全适用。

针对该系统的特点，本文提出通过利用背景特征点进行匹配，并结合相机自身参数以及运动平面参数，来重构虚拟相机之间的单应矩阵，计算特征点在虚拟视差图中的约束关系，从而实现对飞行目标上的特征点进行三维重构。再根据标定的参数和尺度因子计算出目标实际运动距离，结合相机帧率计算出实际运动时间，最终可以计算出飞行目标的线性速度。

第 4 章 基于自适应相似度法的飞行目标滚转速度测量方法研究

4.1 本章引言

借助本文搭建的飞行目标测量系统，本章对目标的滚转速度参数进行计算。最常见的测量滚转速度的方法是在目标表面进行辅助标记，通过对标记的解算推导目标的滚转速度。然而，为了应对在一些特殊场合下无法在目标表面进行辅助标记的情况，本文采用相似度评估的方法计算周期频率，从而得出目标滚转速度。由于本文测量的目标处于飞行运动状态，目标的运动背景时刻变化，传统的相似度法难以准确地进行评估。本文基于自适应提取技术，提出了自适应相似度法，该方法能够实现在动态背景下对目标进行精准的提取，从而排除背景环境对相似度评估的干扰，最后通过周期性算法计算相应频率，得到目标滚转速度。本章主要内容包括滚转速度计算的总体技术路线分析、自适应背景差和相似度评估方法研究、短时调频 Z 变换计算方法研究。

4.2 滚转速度测量技术路线

由前文所介绍的视觉成像原理可知，对于所拍摄的动态目标，根据相机的成像模型几何参数，其空间坐标和图像坐标有着明确的线性变换关系，可表示为：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

式中， s 表示尺度因子， M 表示投影变换矩阵，决定了空间坐标点与目标成像坐标的相对位置关系。

由此可知，目标图像的像素点灰度值的变化可以反应该目标的运动情况。当旋转目标在运动的过程中，图像的灰度分布会随之发生变化，并且灰度分布变化与目标的旋转运动有着相同周期性变化。因此，可以通过计算图像灰度变化的周

期性来求得目标的转速参数，该方法又称为相似度评估法。

考虑到本文系统的研究对象为飞行目标，目标的背景不断变化，直接对其进行相似度评估会受动态背景的干扰，大大降低计算精确度。为此，本文利用自适应背景差法对目标的图像序列进行提取，再对提取到的目标进行相似度评估，度量目标图像之间的相似度水平，本文将该技术称为自适应相似度评估法。为了确保测量的精确性，首先选取图像序列中的前 10 幅的平均灰度值取代单个图像的灰度值作为参考图像，从而可以避免参考图像质量较低带来的误差。其余的图像作为待测对象，依次计算序列中的其他图像灰度值，将其转换为一维的相似度信号，生成周期性的分布图，该信号周期可作为目标滚转一圈的周期，最后计算该周期频率得到目标的滚转速度。结合本文测量系统，该技术的原理如图 4-1 所示：

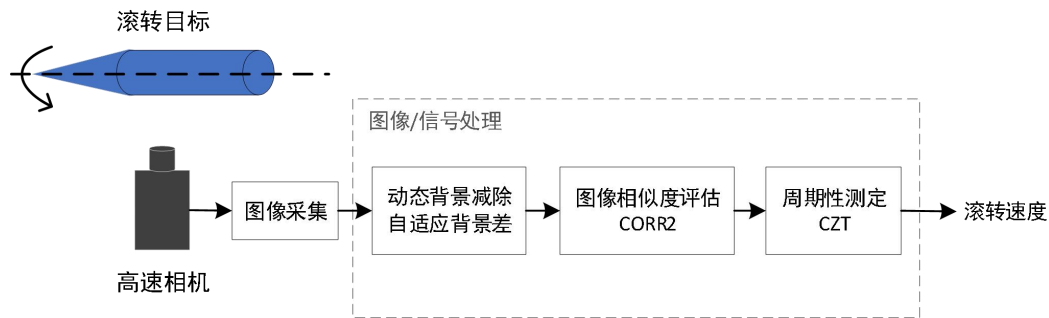


图 4-1 自适应相似度法测量滚转速度原理图

4.3 飞行目标跟踪及相似度评估

在上节内容中详细的介绍了本文测量目标滚转速度的技术路线，核心内容包括图像预处理、相似度评估和周期计算三个部分。为了剔除动态背景对图像相似度评估的影响，本文在图像预处理部分利用自适应背景差法，该方法能够在动态背景下将飞行目标有效的提取出来，便于后续的图像分析。在图像相似度的评估步骤中，本文采用数字图像相关（2-D Correlation, CORR2）算法^[75]对飞行目标进行相似度分析。本节将主要介绍自适应背景差法和数字图像相关性算法。

4.3.1 自适应背景差法

运动目标的提取检测算法主要包括光流法、帧差法和背景差法。其中，光流法无需建立背景模型便可以实现对运动目标的检测，但是该方法对图像的噪声精度要求较高且计算量较大。传统的帧差法对图像序列中相邻的两到三帧图像的像

素灰度值进行差分处理,再与设定的阈值进行比较,能够完成对运动目标的检测,但是难以处理复杂背景下的运动目标。背景差法在检测前会预先选取背景图像作为参考帧,再与后续待处理的图像序列进行差分,将差分得到的图像与设定阈值进行比较,最终提取出所需要的运动目标。然而,在本文的检测中,目标处于高速飞行状态,所处的背景环境是时刻变化的,所以选取的参考背景图像必须随着目标的运动不断的进行更新。为了更好的实现背景更新,完成动态背景下的目标检测,本文采用基于背景差法的自适应背景差法对图像进行目标检测与提取。

背景差法^[76]在处理视频图像序列中目标检测的常用算法,该算法速率高,处理效果好,对目标的定位也比较精确。但是该算法对背景环境的变化敏感,需要有着准确的参考背景作为处理基础,这就要求在处理的过程中不断的更新背景模型。背景模型的更新原理是先在初始图像中得到背景模型,再将下一帧图像与该背景模型做差提取运动目标,提取目标后的图像作为新的背景模型再继续与下一帧进行比较,以此类推背景模型不断的更新,保证了目标检测的精确性。处理算法的基本流程如下图所示:

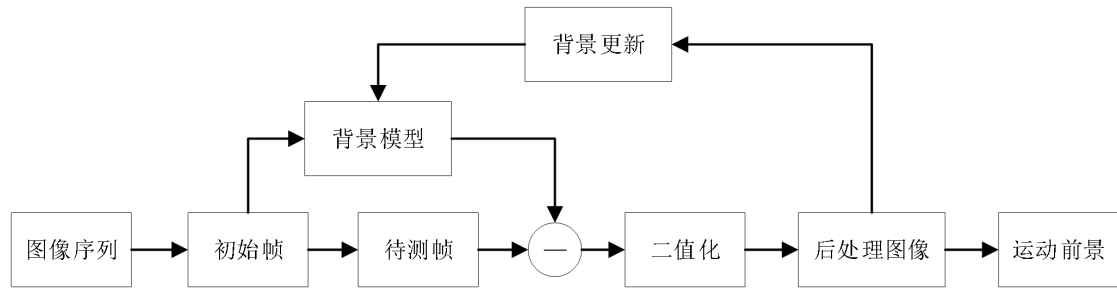


图 4-2 背景差算法流程图

设当前图像为 $I_n(x, y)$, 差分图像为 $p_n(x, y)$, 背景模型为 $B_n(x, y)$, 差分阈值为 T , 该差分算法公式为:

$$P_n(x, y) = \begin{cases} 1, & |I_n(x, y) - B_n(x, y)| \geq T \\ 0, & |I_n(x, y) - B_n(x, y)| < T \end{cases} \quad (4-2)$$

将式 (4-2) 计算后得到的差分图像 $p_n(x, y)$ 进行二值化处理得到检测出运动目标的集合, 记为 $\{G_k, k=1, 2, \dots, k\}$ 。该算法要求背景模型不断的更新以保证检测的精确性, 其更新算法公式为:

$$B_{n+1}(x, y) = (1 - \alpha) \cdot B_n(x, y) + \alpha \cdot I_n(x, y) \quad (4-3)$$

式(4-3)中, 设当前图像为第 n 帧, $B_n(x, y)$ 为当前帧的背景模型, $B_{n+1}(x, y)$ 为

背景模型更新后的结果， α 为更新系数，代表当前图像帧对背景模型更新的方式及更新速率。

背景差法处理效果的好坏取决于背景模型的更新能否有效的适应背景环境的变化。为了更好的适应背景变化，算法通常会加入高斯滤波、形态学处理等方法进行去噪，以提高背景更新的精确性。但是背景环境的更新还受到运动目标本身的影响，在目标移动的过程中，所拍摄的图像经常会出现尾影现象，尤其是当目标运动速度较快时，这对目标提取造成了一定的影响。尾影的形成是由于背景更新模型包含了目标区域，为消除这一影响因素，基于传统背景差法，将待处理的每一帧图像进行划分，将目标区域和背景区域分隔开，再分别利用不同的更新系数 α 进行更新，这样一来目标区域不参与背景模型的更新，就有效可以避免尾影现象。

设帧间差分二值图像的计算公式如式(4-4)：

$$P_n(x, y) = \begin{cases} 1, & |I_n(x, y) - I_{n-1}| > T \\ 0, & |I_n(x, y) - I_{n-1}| \leq T \end{cases} \quad (4-4)$$

由式(3)得到帧间差分二值图像后，进行图像预处理获取一个不连通的运动目标合集，记为： $\{H_k, k=1, 2, \dots, k\}$ 。

对背景差分和帧间差分共同检测出的前景区域进行背景更新，其他区域以原速率进行更新，将其设定为 0.1，如式（4-5）：

$$\alpha = \begin{cases} 0, & (x, y) \in \{G_k, k=1, 2, \dots, k\} \cap \{H_k, k=1, 2, \dots, k\} \\ 0.1, & \text{其他} \end{cases} \quad (4-5)$$

式（4-5）中，当目标属于前置检测出的运动目标集合 G_k 和 H_k 时，就不继续更新，否则仍然按当前速率更新。这样便可保证背景模型随环境的变化而不断更新，更加准确的检测出动态背景下的运动目标。

如图 4-3 所示，给出了动态背景下的两帧图像使用自适应背景差分法处理的结果。由此可以看出，该方法在动态背景下能够成功提取出研究所需要的测量目标，避免了动态背景对后续相似度评估带来的干扰，为之后的测量分析提供了条件。

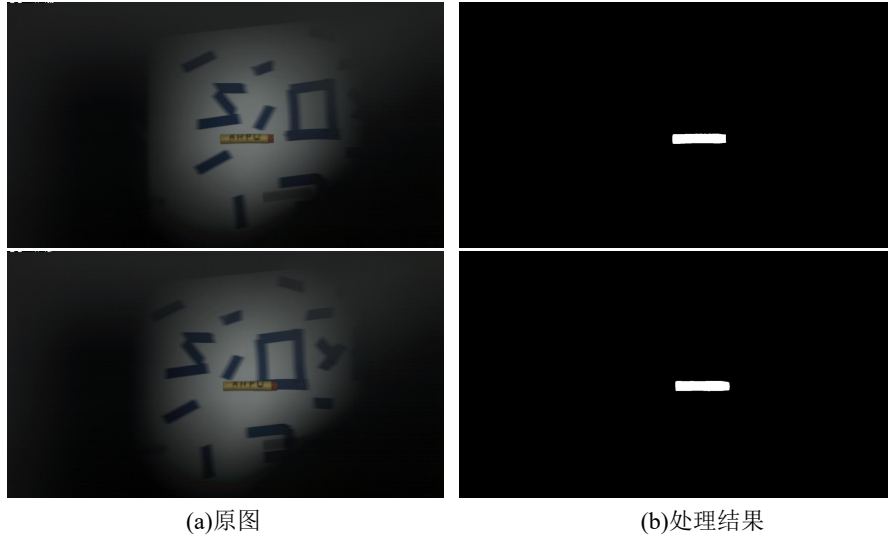


图 4-3 自适应背景差法处理结果

4.3.2 图像相似度评估法

经过上一小节图像自适应差分法的处理，能够得到经过去噪等预处理的飞行目标提取后的图像，经过预处理后的图像序列具有更明显的图像灰度分布，为本节的图像相似度评估提供了图像基础。在评估滚转目标图像序列的相似度时，本文采用数字图像相关（2-D Correlation, CORR2）算法进行计算。这一方法早已提出，但是通常是应用与对图像质量的评估分析当中，很少用于目标的运动状态监测测量当中。通过对目标图像序列连续的与参考图像进行比对分析，可以得到一个反应目标相似程度的频率信号图。

二维相关法用于建立两个被测量之间存在线性关系的概率程度，是评估图像相似度常用的方法之一。常用的有关图像灰度分布相关系数度量指标有：误差平方和系数、绝对误差和系数以及归一化互相关系数。本文利用其中的归一化互相关系数对目标图像序列与参考图像进行评估，计算图像的灰度分布相关性。

相同尺寸的两幅图像之间的相似程度用相关系数来表示，对于分辨率为 $m \times n$ 像素的两幅图像 X 和 Y ，相关系数 r 定义为：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [X(i, j) - \bar{X}][Y(i, j) - \bar{Y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [X(i, j) - \bar{X}]^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [Y(i, j) - \bar{Y}]^2}} \quad (4-6)$$

式（4-6）中 $X(i, j)$ 和 $Y(i, j)$ 分别是图像 X 和 Y 中点 (i, j) 处的灰度值。 $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别是矩阵 X 和 Y 的平均强度值，分子部分表示度量相关性，分母部分表示

归一化因子。当两幅图像完全相同时，相关系数 r 无限接近于 1，当两幅图像完全不相关时， r 无限接近于 0，由此可见相关系数 r 越接近 1，说明两幅图像之间的相似度越高，而在。在计算过程中，将第一幅获取的图像作为参考对象，其他图像与第一幅图像进行强度分布比较，得到表示序列图像相似程度的时域信号。



图 4-4 相似度评估目标图像

图 4-4 给出了经过自适应背景差分后得到的目标图像，对该图像序列进行相似度评估，即可得到关于这组图像序列的相似度信号图。图 4-5 给出了转速在 600RPM 时得到的典型相似度信号，可以看出，由于目标不停的旋转，得出的信号是周期性的，由于存在噪声等因素的干扰，实际得到的信号值会在理论值附近波动。

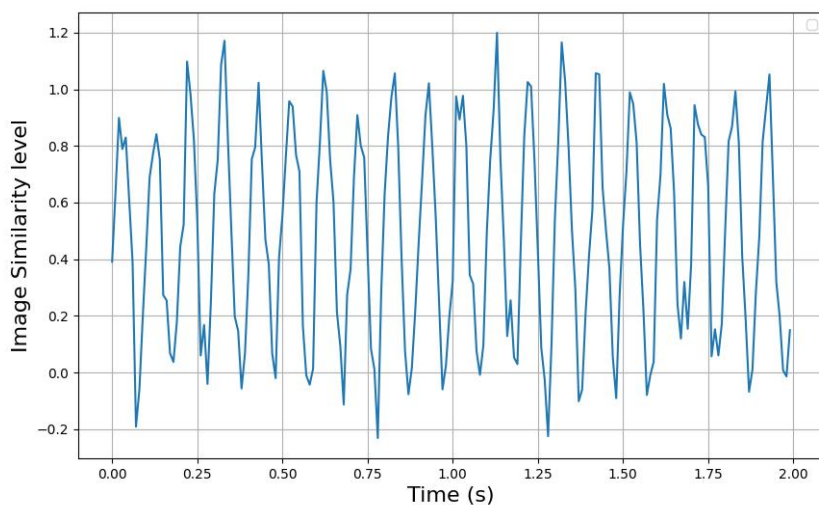


图 4-5 图像相似度结果信号

4.4 周期性计算方法研究

在得到相似度信号图后（图 4-5），需要计算该频率的周期，通过使用周期性确定方法，从重构的相似信号的周期性中获得转速。传统的周期性计算方法，如快速傅立叶变换和自相关算法，在有限的采样周期下测量效果不佳。为了提高

系统的测量精度和效率,本文研究采用滑动短时窗函数对信号图进行分段以及预处理工作,再通过对比基于抛物线插值的自相关法(PIAC)和 Chirp-Z 变换(CZT)来确定本文的周期性算法,从而完成目标滚转速度的计算。

4.4.1 滑动短时窗函数处理

在实际的拍摄测量中,滚转目标往往并不是单一的做自转运动,同时伴随着其他线性运动,这会导致表示图像相似程度的信号具有时变性。为了保证测量的实时性与精确性,参考时频分析法,本文采用滑动短时窗函数对相似度信号进行频段分割。

$$S_i(t) = S(t)\omega(t - iT_d) \quad (4-7)$$

式(4-7)中,一维信号 $S(t)$ 表示图像序列之间的相似程度, T_d 表示两个连续信号片段之间的时间偏移,该式以时间 $t = iT_d$ 为中心,以 $\omega(t - iT_d)$ 作为短时窗函数沿着时间轴移动,不断的对图像相似度信号进行分割切片。为了减小信号遗漏带来的影响,在信号处理过程中本文将时间偏移 T_d 设置为 0.2 秒,选择长度为 1 秒的高斯窗口对信号进行分析。

在对信号进行了一定的分割处理后,需要使用周期频率的计算方法,提取信号段 $S_i(t)$ 的周期,为了提高系统的测量精度和效率,本文分别研究比对了两种周期性算法,选择最佳方法作为本文的算法。

4.4.2 算法研究

(1) Chirp-Z 变换法

将图像相似度信号片段的主频率近似等于目标的转子频率,每个主峰的位置对应所处信号段的瞬时旋转频率 f_i 。此时,对每个相似度信号段进行 CZT 变换计算,得到瞬时滚转频率,接着转换为目标的滚转速度。该计算策略利用了 CZT 变换具有优越的频谱校正功能,结合图像的相似度评估以及短时窗函数,将转速计算的问题转换为图像相似信号的频率求解问题。该方法可以详细地计算出某一频段的频谱,从而实现高分辨率的测频,能够在比奈奎斯特总频谱更小的频带内探索信号的峰值响应,并以较低的计算复杂度显著地细化低分辨率傅立叶频谱。文献^[77]表明 Chirp-Z 变换在研究具有短时窗函数处理的非稳定信号频率峰值响应的最佳方法。

首先给定一个有限长度的序列 $S(k)(k = 1, 2, \dots, N)$, 则 $S(k)$ 的 Chirp-Z 变换 $R(m)$

定义为：

$$R(m) = \sum_{k=1}^N S(k) Z_M^{mk} \quad (m = 0, 1, \dots, M-1) \quad (4-8)$$

其中 M 为 Chirp-Z 变换中任意正整数的采样点数。 Z_M^{mk} 是变换核，计算式为：

$$Z_M^{mk} = \exp\{-j \times (2\pi k / f_s) [f_0 + (f_1 - f_0)m / M]\} \quad (4-9)$$

式中 f_s 为采样率， $[f_0, f_1]$ 为频率观测区间，作为实际旋转频率大致范围的先验信息。在研究中， f_0 和 f_1 分别由下两式确定：

$$f_0 = f_F - f_s / N \quad (4-10)$$

$$f_1 = f_F + f_s / N \quad (4-11)$$

其中 f_F 是通过快速傅立叶变换算法，由信号频谱中幅值最大的频率确定。

在解得 CZT 变换中 $R(m)$ 的值后，高分辨率频谱的振幅峰值对应第 i 个信号段的主频分量，也就是瞬时旋转频率 f_i 。CZT 变换中的频率分辨率 Δf_c 由频率观测带的长度以及所覆盖的频率元素的数量决定，将其定义为：

$$\Delta f_c = \frac{f_{i1} - f_{i0}}{M} \quad (4-12)$$

得到此时目标滚转速度的分辨率为：

$$\Delta N = 60 \Delta f_c = \frac{120 f_s}{MN} \quad (4-13)$$

(2) 基于抛物线插值的自相关方法

根据视觉测量原理，运动目标的滚转周期可以视作等价于相似度信号 $S_i(k) (k = 1, 2, \dots, N)$ 的对应时段的分段信号周期。分段信号的周期可由自相关函数估算得到。本文采用的归一化自相关函数如下式：

$$R_i(m) = \frac{\sum_{k=1}^N S_i(k) S_i(k+m)}{\sum_{k=1}^N S_i^2(k)} \quad (4-14)$$

其中， N 代表相关计算点数， $m (m = 0, 1, \dots, N)$ 代表延时点数。为便于计算，在本文的测量系统中，将每个分段信号的采样点数设置为 $2N$ 。从自相关函数 $R_i(m)$ 得到分段信号的相关系数，除零点以外的第一个信号峰值点，各个峰值点之间的

对应时间即为周期 T 。为了降低测量系统性能(如低帧率拍摄系统)对测量带来的误差,本文采用插值自相关的计算策略,即对自相关函数的峰值进行抛物线拟合作差,以获得更加精确的旋转周期。该方法在初步粗略估算的旋转周期点周围再选择三个采样点,进行抛物线拟合更加精确的计算其峰值。具体求解过程如下:

首先需要确定用于抛物线插值的三个采样点,用坐标 $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$ 表示这些采样点。其中,坐标参数 x 由以下公式得到:

$$x_1 = \tau_i - \frac{1}{f_s} \quad (4-15)$$

$$x_2 = \tau_i \quad (4-16)$$

$$x_3 = \tau_i + \frac{1}{f_s} \quad (4-17)$$

其中, f_s 为相机帧率, τ_i 为初步自相关分析得到的信号段 S_i 的粗略周期,将上述三个采样点进行拟合,得到拟合抛物线函数:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4-18)$$

其中,函数中的各个参数计算方式如下:

$$a = \frac{(x_1 - x_3)(y_1 - y_2) - (x_1 - x_2)(y_1 - y_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)(x_2 - x_3)} \quad (4-19)$$

$$b = \frac{(y_1 - y_2) - a(x_1 - x_2)^2}{(x_1 - x_2)} \quad (4-20)$$

$$c = y_1 - ax_1^2 - bx_1 \quad (4-21)$$

最终可得到相似度信号段的精确峰值也就是目标的精确旋转周期为抛物线顶点的横坐标:

$$T_i = -\frac{b}{2a} \quad (4-22)$$

为了比较 CZT 变换与其他周期测量方法,本文在相同的测量环境下(5000 lx 光照条件, 1920 像素×1080 像素分辨率, 500 帧/s),从精确度和系统复杂度两个方面将该方法与抛物线插值的自相关(PIAC)周期算法进行了比对。精确度对比情况如图 4-6 所示,两者在系统复杂程度方面是一致的,且随着目标设定转

速的增加，两者的测量相对误差也在减小。但是，在相同的转速下，CZT 的测量精度明显优于 PIAC，在此条件下 CZT 最大相对误差在 $\pm 0.4\%$ 以内，PIAC 在 $\pm 0.6\%$ 以内。由此，可以得知基于 CZT 的周期性计算方法更占优势，故本文采用 Chirp-Z 变换作为最终的周期性计算方法。

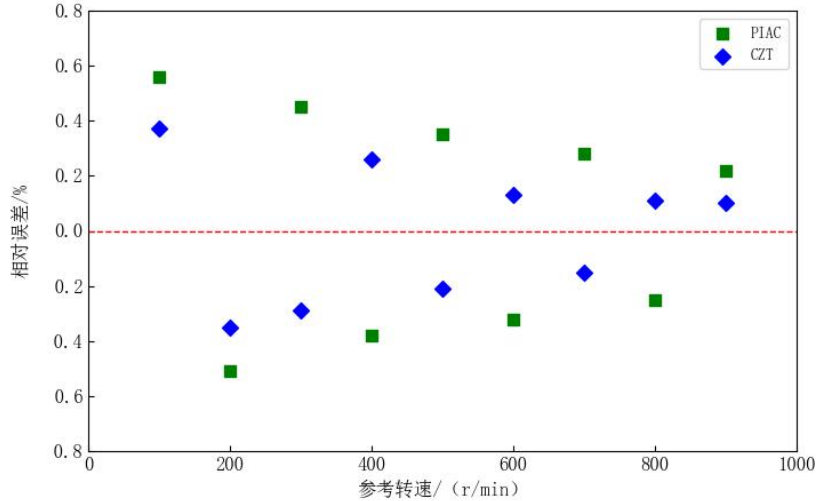


图 4-6 CZT 与 PIAC 算法的比较结果

4.5 本章小结

本章完成了在动态背景下对飞行目标的提取以及滚转速度的测量任务。首先概述了本文测量飞行目标滚转速度的整体技术路线，借助成像原理以及图像灰度的变化情况说明了图像相似度法测量目标转速的可行性。接着为了避免动态背景对相似度评估的干扰，引入了自适应背景差法对目标进行跟踪提取，为后续的相似度评估提供了优质图像基础。在对目标进行相似度评估步骤中，本文采用了数字图像相关算法，通过对目标图像序列连续地与参考图像进行比对分析，可以得到一个反映目标相似程度的信号频谱图。最后利用周期性算法对得到的信号频谱图进行分析计算，得到周期频率，完成对目标滚转速度的计算。

本章内容与第三章中关于目标线性速度的计算内容为并列关系，两章分别详细地分析了在振镜拍摄系统下测量飞行目标线性速度和滚转速度的技术原理和计算方法。下一章，本文将基于这两章的计算方法，搭建实验平台进行验证。

第 5 章 实物实验与结果分析

5.1 本章引言

在本文的前四章中，详细地介绍了基于扫描振镜的测量系统的基本结构和工作原理，以及本文对飞行目标线性速度和滚转速度两种运动参数的具体计算方法。本章将基于上述的测量系统和测量方法选择合理的实验设备，完成实验平台的搭建。另外，对本文提出的系统以及方法的性能进行实验验证，并从光照条件、图像分辨率、拍摄帧率和目标位移量等几个方面分析系统参数和实验环境等因素对测量精度的影响。

5.2 实验平台搭建与测试

5.2.1 平台搭建

基于第二章的系统设计原理进行实验平台的搭建，实验平台所需设备主要包括：高速相机、扫描振镜、控制系统、驱动模块、图像采集软件以及外部光源组成。实验平台核心部分的搭建以及振镜与相机的位置关系如图 5-1 所示：

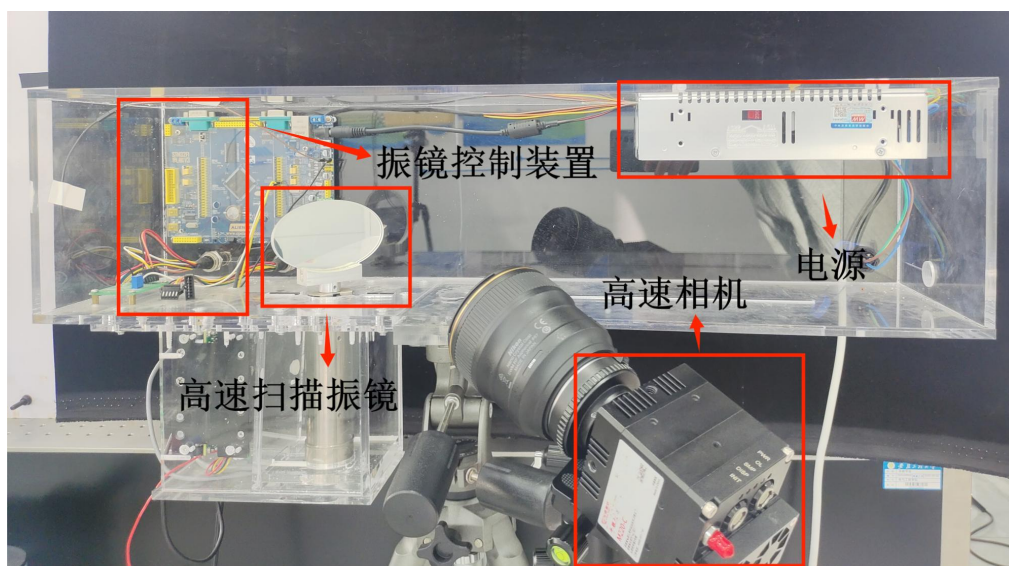


图 5-1 凝视跟踪系统

图 5-1 中，该系统采用了型号为天传奇 SC50 的振镜系统，包括嵌入式控制

系统（STM32F103），拍摄设备选择型号为千眼狼 M220 的高速相机以及配套的图像采集软件，另外还有 EF-220 补光灯控制光照条件。从图中可以看出，正如第二章描述，高速相机与扫描振镜呈仰角式位置关系放置。

在该系统中，扫描振镜作为核心设备，其选型对整个系统的影响是至关重要的。为了保证精确的跟踪飞行目标同时拥有更大的跟踪视野，综合对比响应速度、偏转范围、定位精度等参数，本文最终选择天传奇 SC50 型号的扫描振镜，其具体参数如下表 5-1 所示：

表 5-1 扫描振镜主要参数

参数名称	参数数值
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	$\pm 10\text{V}$
步进响应时间	0.12 ms
扫描角度范围	$\pm 20^\circ$
扫描速度	50Kpps
工作温度	$0\text{-}50^\circ\text{C}$
镜片反射率	$>99\% @ 45^\circ$ 入射

根据上表参数信息可知，该型号振镜响应速度快，仅需要 0.12ms 。并且拥有近 40° 的旋转范围，根据第二章的分析可知该系统至少可以使得相机跟踪近 80° 的视野范围，能够完成对飞行目标的全过程跟踪。该振镜稳定性好、精度高、跟踪范围大可以满足本文系统的测量需求。

在确定了扫描振镜型号后，需要对系统的另一核心设备高速相机进行选型。高速相机的性能直接影响到整个系统的拍摄质量和分析速率，方便后续的参数计算。经综合比对分析，本文选用千眼狼 M220 高速相机，主要参数如下表 5-2 所示：

表 5-2 高速相机主要参数

参数名称	参数值
最大分辨率	1920×1080
满画幅帧率	2000FPS
最高帧率	16900FPS
内存容量	64GB
曝光时间	1us
工作温度	-20°-60°

由上表可知，该型号相机可以在最大分辨率 1920×1080 下达到 2000FPS 的拍摄帧率，通过万兆网口连接图像采集软件，实现对图像的采集与分析，完全满足本文系统的测量需求。

本文研究需要对飞行目标的运动参数进行测量分析，为此，本研究自制了一套模拟发射装置，发射 EVA 橡胶玩具子弹用于模拟飞行目标，该装置的设计模拟图如下：

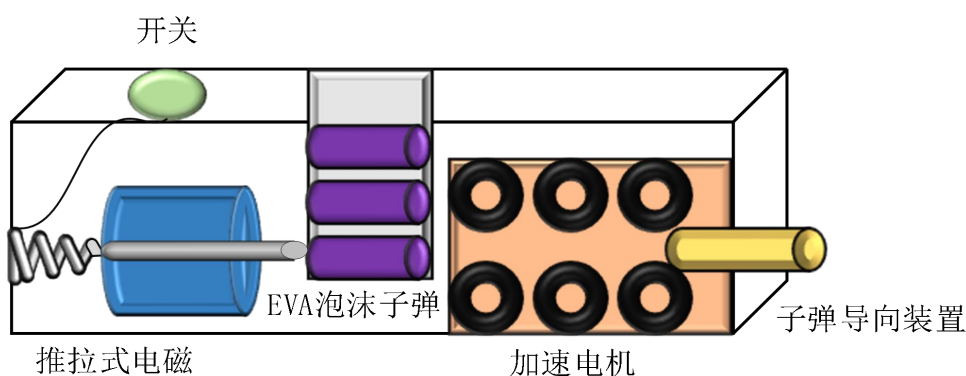


图 5-2 飞行目标发射装置模拟图

该发射装置的工作原理是通过尾部的推拉电磁铁将模拟飞行目标 EVA 泡沫子弹推送进入由电机驱动转轮组成的加速区，从而加速目标并使其获得较高的初速度，最终通过子弹导向发射管发射出去。电机的转速可调，可以通过调整电机速度来控制目标的发射速度，该装置最高可将模拟目标加速至 40m/s，能够测试系统对不同发射速度目标的跟踪性能。图 5-3 展示了模拟发射装置的实物图。

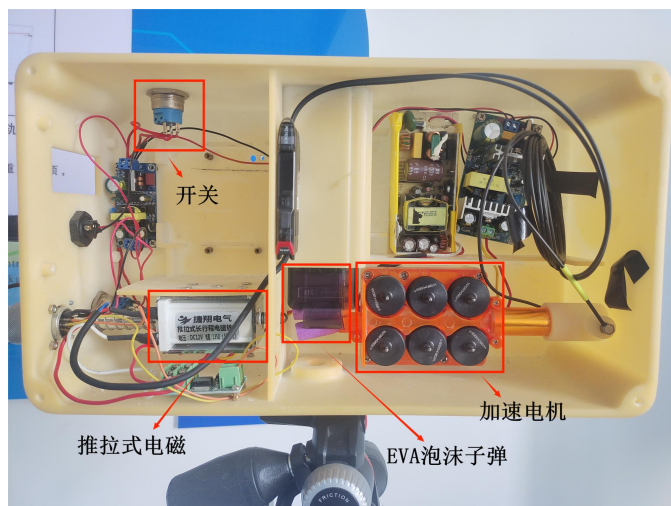


图 5-3 模拟目标发射装置实物图

5.2.2 飞行目标拍摄实验

在完成设备选型和实验平台搭建工作后，为了测试该系统的实际拍摄效果，我们对模拟飞行目标进行了实际拍摄实验。振镜与相机采用仰角式结构摆放，两者相距 50mm，振镜距飞行目标运动轨迹的距离为 2m，将上一章节设计的模拟泡沫子弹作为拍摄目标，发射速度设置为 30m/s。实际拍摄效果如下：

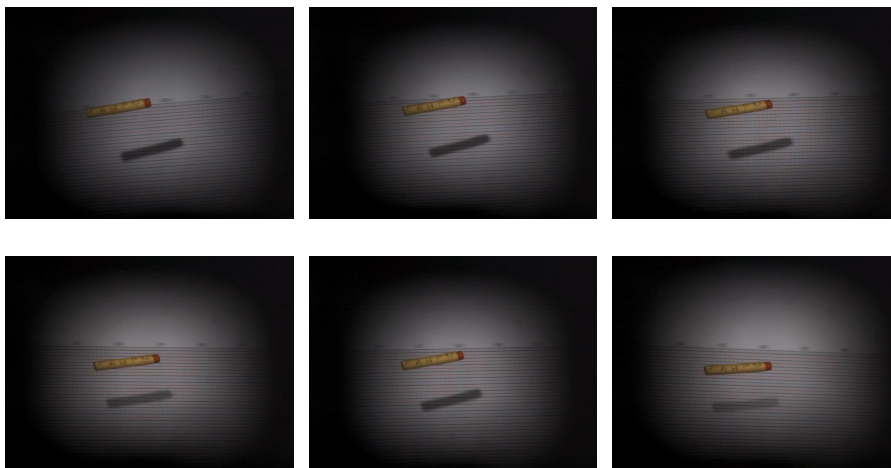


图 5-4 系统实际拍摄效果图

从图 5-4 的实际拍摄效果图可以看出该系统对飞行目标的跟踪拍摄效果良好，实验有效跟踪轨迹超过了 3m，目标清晰可见且始终位于视野的中央，可以清楚的反应目标的运动姿态变化情况，从背景和目标表面标记的变换情况可以看出目标在做飞行途中伴随着自身的滚转运动。本文设计的基于扫描振镜的拍摄系统比单相机系统拍摄效果清晰，拍摄范围广，比多目系统成本低，系统复杂度低，

下文的实际测量实验在此平台的基础上进行。

5.3 线性速度测量实验与结果分析

在这一节当中，我们将搭建验证实验平台，对前文提出的测量线性速度的方法进行精度验证以及影响因素的分析。为了获取准确的参考值便于对比分析，实验将在静态平台下进行。首先固定一台高精度机械臂，由机械臂控制模拟目标的线性运动，在机械臂运动轨迹的后方放置背景板，便于背景特征点的提取。接着需要在机械臂上安装标定板，使用张正友标定法对相机进行标定，获得内参矩阵 K 。利用 EF-220 补光灯控制照明条件，将相机固定于三脚架上，捕获机械臂的运动过程，拍摄第一张图片，记录机械臂的起始位置，作为目标的起点。随后，操控机械臂在平面内平移一定距离，模拟目标在平面内的运动，并改变相机的视角拍摄第二张图片，从而模拟虚拟相机在凝视跟踪系统对目标的跟踪拍摄过程。验证平台如下图 5-5 所示：

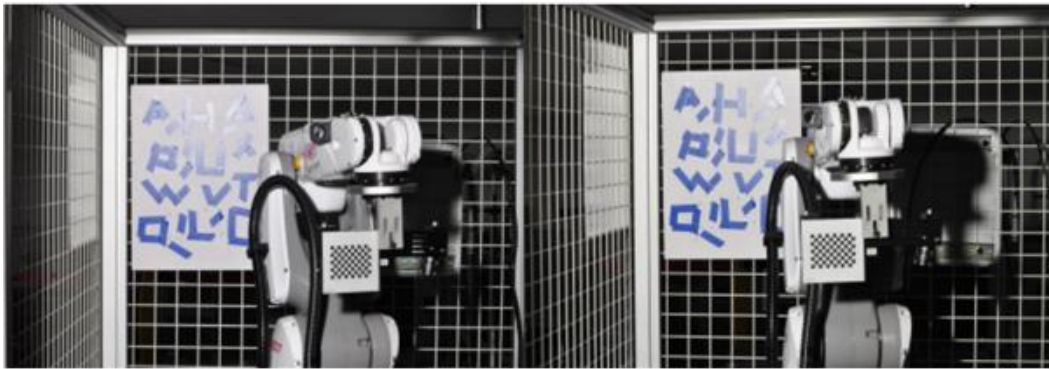


图 5-5 位移测量方法精度验证平台

机械臂的位置移动信息通过控制器可以精准记录，以机械臂的坐标移动为参考标准，验证本文算法的有效性以及鲁棒性。如表 5-3 所示，进行了三组实验测试。为了探究光照条件，图像分辨率以及位移量的大小对该测量系统性能的影响，在实验 I、实验 II 和实验 III 中分别对系统不同光照条件下（2000Lux、5000Lux 和 8000Lux）、不同图像分辨率下（720p、1080K 和 2K）和不同位移量下（5-10mm 和 5-10cm）进行了评估。每次实验目标均位移 9 次，包括起始位置，共计拍摄 10 张照片，使用本文的方法进行测量，测量精度用测量位移与参考位移之间的相对误差来表示。

表 5-3 位移精度测试方案

编号	光照条件(Lux)	图像分辨率(pixels)	目标位移量
I	2000/5000/8000	1080p	5-10cm
II	5000	720p/1080p/2K	5-10cm
III	5000	1080p	5-10cm/5-10mm

(1) 光照强度是影响测量效果的关键因素之一，为了更加直观的体现出光照强度对该方法测量精度的影响，在相同的条件下，图像分辨率设置为 1080p，模拟目标移动 5-10cm 将补光灯档位调至 2000 lux、5000 lux 和 8000 lux 进行了共计 9 次的实验测试。如图 5-6 所示，可以看出无论是在较强光或较弱光照条件下相对误差总是控制在 $\pm 2.0\%$ 以内，另外在 5000lux 光照度下相对误差最小，这是因为在较暗或较强的光照条件下对背景特征点的提取和匹配都有一定的影响。因此，在实际测量中需要控制好光照条件，以达到最优实验环境。

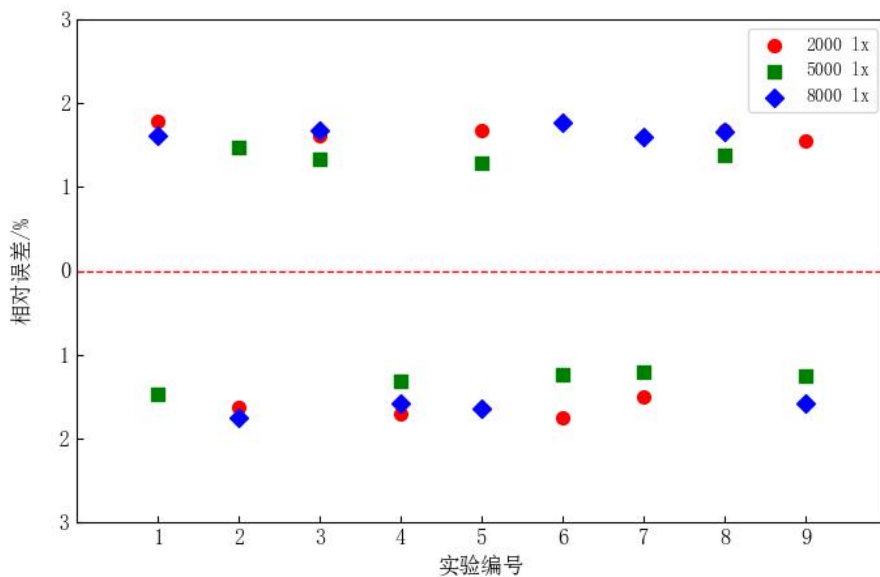


图 5-6 不同光照条件下测量误差

(2) 图像分辨率是影响视觉测量系统性能的关键因素之一。为分析不同分辨率下该测量系统的性能，分别在相同的条件下，光照设置为 5000 lux，模拟目标移动 5-10cm，在不同分辨率的图像下使用该系统进行测量，包括 1280 像素×720 像素、1920 像素×1080 像素和 2048 像素×1080 像素分辨率。结果如图 5-7 所示，可以看出随着图像分辨率的提高，图像质量越高，特征点的提取与匹配也

更加精确，误差也随之减小。在 2048 像素 $\times$ 1080 像素的分辨率下，相对误差控制在 $\pm 1.0\%$ 左右，而在 1280 像素 $\times$ 720 像素的分辨率下误差在 $\pm 2.0\%$ 左右。但是随着图像质量的提高，系统成本也在增加，所以在实际测量中，可根据测量具体要求选择合适的分辨率大小。

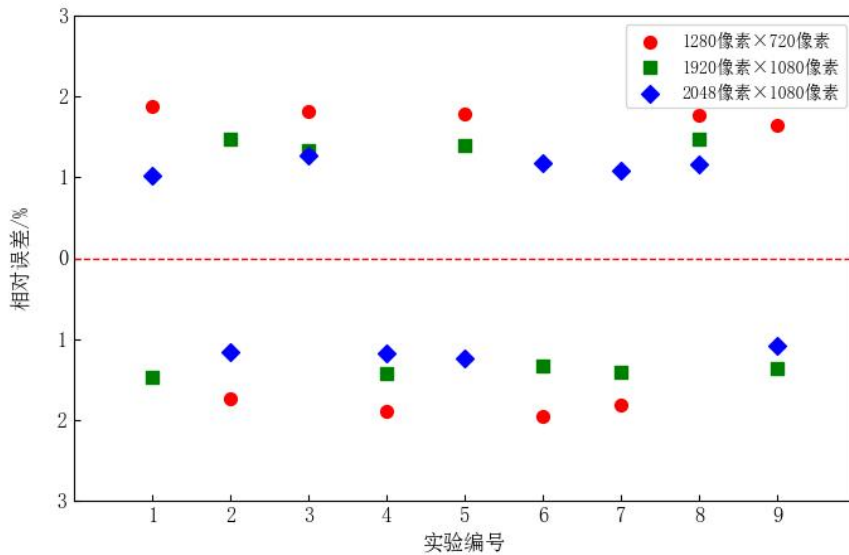


图 5-7 不同分辨率下的测量误差

(3) 该系统通过测量模拟目标的位移大小来验证方案的精确性，为验证该系统在微小环境下，目标位移量较小时的测量效果，在相同实验环境光照设置为 5000 lux，图像分辨率设置为 1080p 下，控制模拟目标位移量为 5-10mm 进行一系列的测量分析。测量结果如图 5-8 所示，可见位移量在 5-10mm 相对误差达到 $\pm 2.0\%$ 以内，而 5-10cm 相对误差在 $\pm 1.5\%$ 左右，说明该系统在微小位移量的环境下也可以达到良好的精度。

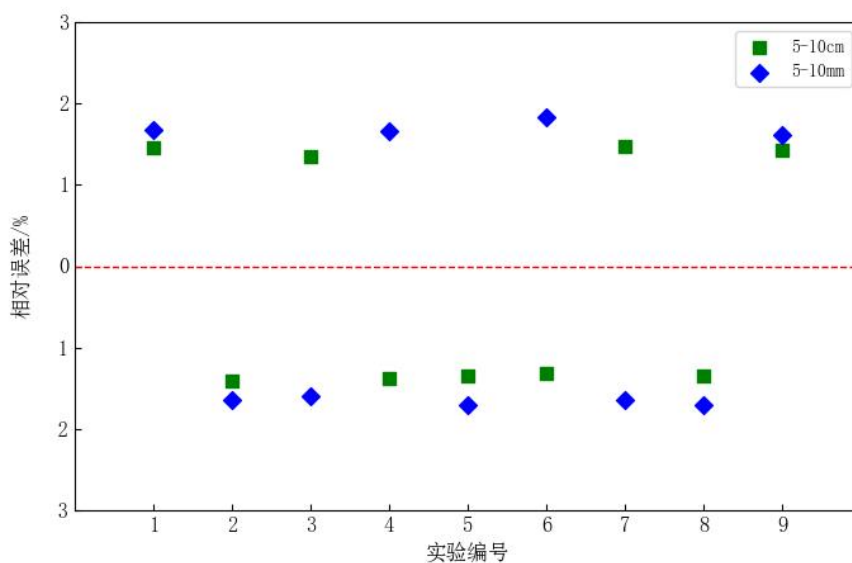


图 5-8 不同位移大小的测量误差

5.4 滚转速度测量实验与结果分析

在本节中，为了验证目标滚转速度测量方案的精确性和鲁棒性。本研究搭建了如图 5-9 所示的静态实验系统，该系统包括可调速长轴直流电机，转速从 0 到 1000RPM 可调，EF-220 补光灯控制照明条件，模拟旋转目标，商用激光测速仪提供对比参考，高速相机对焦在目标的侧面，用笔记本电脑控制相机，并实现图像处理（包括背景减除和相似度评估），参数计算（CZT 变换）等。具体操作如下：将测量目标固定在电机的轴上，高速相机放置在三角架上，对焦目标侧面，启动电机调节到一定转速，用激光转速仪测量电机转速，待其稳定后再使用高速相机对目标拍摄一组图片进行分析计算。

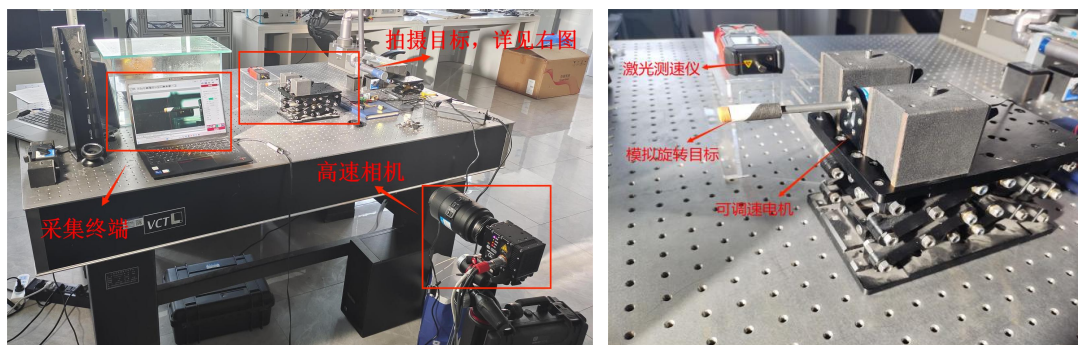


图 5-9 转速测量方法精度验证平台

研究进行了如表 5-4 所示的三组实验测试。为了探究光照条件，图像分辨率以及拍摄帧率对该测量系统性能的影响，在实验I、实验II和实验III中分别对系统不同光照条件下（2000Lux、5000Lux 和 8000Lux）、不同图像分辨率下（720p、1080K 和 2K）和不同帧率下（300fps、500fps 和 1000fps）进行了评估。在每次实验测量中，选取所拍摄的连续的 100 帧图像序列，在相同的测试条件下，每次重复性测试总共进行 20 次，最终取平均值作为计算结果。在本研究中，测量精度用测量速度与参考速度之间的相对误差来表示。

表 5-4 转速精度测试方案

编号	光照条件(Lux)	图像分辨率(pixels)	帧率 (fps)	转速(RPM)
I	2000/5000/8000	1080p	500	
II	5000	720p/1080p/2K	500	100-900
III	5000	1080p	300/500/1000	

(1) 对于所提出的系统的测量性能，光照条件是一个重要的影响因素。为了量化光照条件的影响，分别在相同的条件下，将补光灯档位调至 2000 lux、5000 lux 和 8000 lux 进行了一系列的实验测试。如图 5-10 所示，测量转速与参考转速之间的对比表明，在不同光照条件下该系统的最大相对误差在 $\pm 0.65\%$ 以内，在给定的转速范围内能够提供准确可靠的测量。此外，随着转速的提高，系统的测量精度也得到了提高。值得注意的是，研究发现在 5000 lux 光照度下的测量精度均优于 2000 lux 和 8000 lux 光照条件下的测量，这是因为在过亮的环境下，可能会使图像出现过曝现象导致细节丢失，或是出现图像过于饱和导致颜色失真。在过暗的环境下，导致图像缺乏光照而无法清晰拍摄，造成图像模糊。这些均会影响图像相似度的评估精度。因此，光照条件过亮或过暗都会对图像相似度评估产生不利影响，需要通过适当的处理和调整来改善图像质量，以提高相似度评估的准确性。

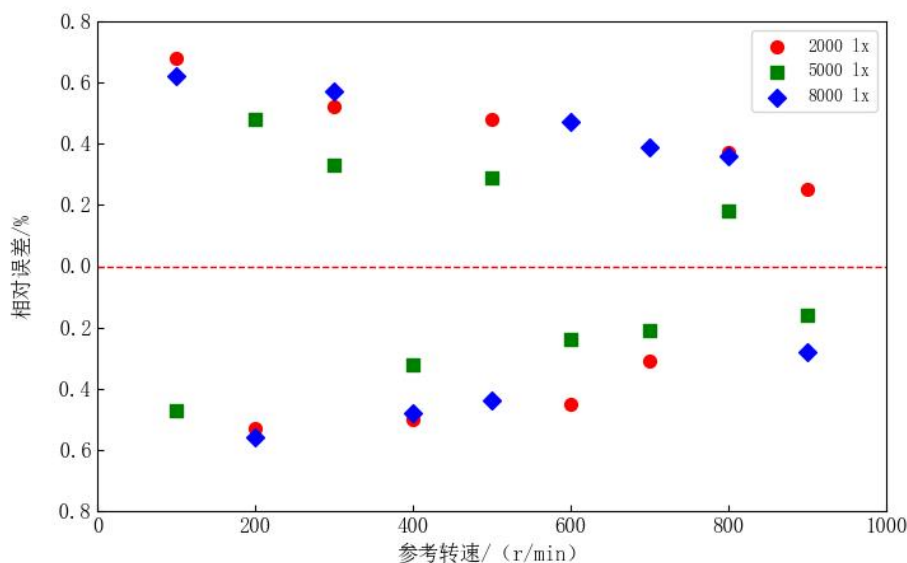


图 5-10 不同光照条件下的测量结果

(2) 图像分辨率是视觉测量系统的关键指标，对系统的测量性能起着至关重要的作用。为了研究图像分辨率对该系统的影响，分别在相同的条件下，测试了不同分辨率的图像，包括 1280 像素×720 像素、1920 像素×1080 像素和 2048 像素×1080 像素分辨率。如图 5-11 所示，测量转速与参考转速之间的对比表明，即使是在 1280 像素×720 像素的分辨率下，该系统的最大相对误差也在±0.6%以内，可以完成对目标转速的准确测量。另外，实验结果表明，图像分辨率越高，所测量的结果也更加准确。这是因为在更高的分辨率下，系统会获取更多的像素数据来计算由目标的旋转运动而造成的强度分布的变化，从而增强了相似信号的周期性。但是，越高的图像分辨率也就意味着系统的成本越高、所需要的计算时间越长。因此，应当根据具体情况选择合适的图像分辨率，在保证测量精度的同时提高效率，降低成本。

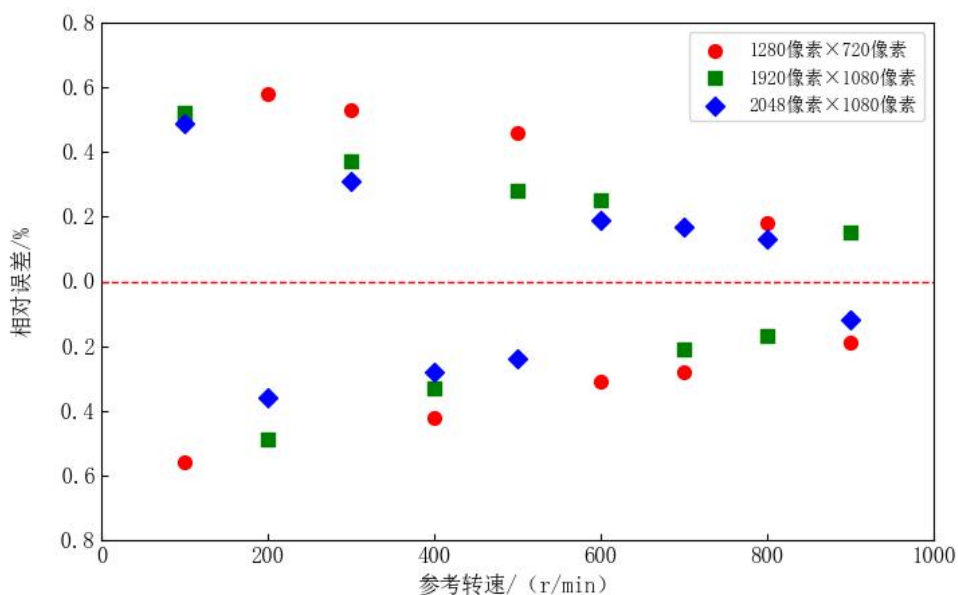


图 5-11 不同分辨率下的测量结果

(3) 拍摄帧率同样也是该测量系统的关键指标，是影响测量效果的一个重要因素。为了研究拍摄帧率对该系统的影响，在相同的条件下，分别以帧率为 300 帧/s、500 帧/s 和 1000 帧/s 进行对比实验。数据如图 5-12 所示，测量转速与参考转速之间的对比表明，即使是在拍摄帧率为 300 帧/s 的情况下，在给定转速范围内也能够提高准确的测量。在所有的测量条件下，该系统的最大相对误差在 $\pm 0.5\%$ 以内，这一结果验证了该系统在低成本低分辨率下进行转速测量的可行性。另外，值得注意的是，帧率限制了转速的测量范围。为了避免时间混叠，根据奈奎斯特采样准则，相机的帧率应该至少是旋转频率的两倍。实验数据表明，更高的拍摄帧率会获得更准确的测量结果，因为随着帧数的增加，信号会变得更平滑。因此，帧率的高低对于系统的测量精度以及可测量的转速范围的影响至关重要。

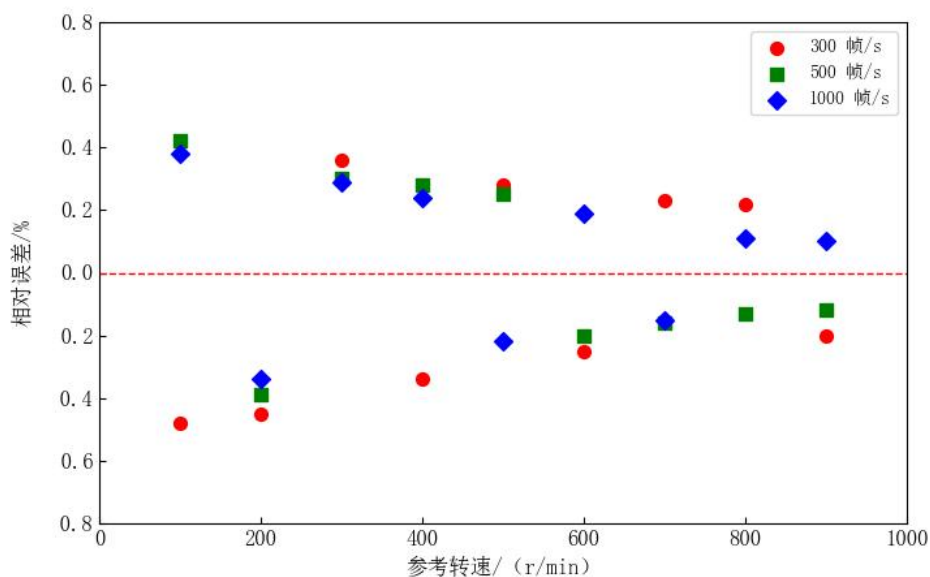


图 5-12 不同帧率下的测量结果

5.5 本章小结

本章完成了实验器件的选型和实验平台的搭建以及测试工作。实验结果表明该实验系统所拍摄的图片可以清晰地跟踪飞行目标，并使目标保持在视野中央，能够良好地完成对飞行目标的跟踪拍摄工作。另外，本章搭建了两套静态实验平台，对本文所提出的测量飞行目标线性位移和滚转速度的方法进行了精度验证以及影响因素分析，实验数据表明在正常光照条件下，测量目标位移的平均相对误差控制在 $\pm 1.5\%$ ，测量目标滚转速度的平均相对误差控制在 $\pm 0.65\%$ 以内。

而对于影响因素的分析，实验结果表明光照强度、图像分辨率、目标位移量和目标滚转速度的大小、相机帧率等因素都在不同程度上影响实验测量精度，在实际测量中需要根据实验成本、精度要求、实验环境等因素综合考虑，搭建最优测量平台。

第6章 总结与展望

6.1 总结

本文围绕高速飞行目标线性速度和滚转速度两种运动参数的测量,从理论到实验展开了系统的研究。首先,为解决高速飞行目标的跟踪拍摄清晰度低以及拍摄视场小的问题,本文利用扫描振镜结合高速相机搭建了飞行目标的拍摄系统,实验表明该系统可以完成对高速飞行目标的跟踪拍摄。在该系统的基础上,本文针对飞行目标的线性速度和滚转速度分别提出了相应的测量方法,并做了验证实验,结果表明本文所提出的系统和方法能够完成对飞行目标这两种运动参数的测量。本课题的研究成果可应用于武器研发等工业领域以及体育赛事等场景,具有重要的工程实践意义。

论文的主要研究工作如下:

(1) 针对高速飞行目标的跟踪拍摄困难问题,本文利用扫描振镜设计了一套凝视跟踪系统。该系统主要由扫描振镜、高速相机、控制驱动模块和视觉算法平台构成,其工作原理是由驱动模块控制扫描振镜跟随飞行目标旋转,从而改变高速相机的拍摄视角,使得飞行目标一直位于相机拍摄视野内,实现对飞行目标的跟踪拍摄。另外,本文对该系统的两种光路模型和扫描振镜的旋转模型进行了研究,分别为平行式光路结构和仰角式光路结构,经过计算分析,确定了本文系统采用仰角式光路结构进行拍摄。

(2) 针对凝视跟踪系统中因视角变化无法直接对目标进行三维重构这一情况,本文提出利用背景信息进行特征点三维重构的方法确定飞行目标的线性位移,进而完成对飞行目标线性速度的计算。该方法的核心是在相邻帧的两幅图像中,利用背景特征点进行特征点匹配,进而重构出这两幅图像中目标所在平面对应的单应矩阵,找到空间点在两个像素平面上的投影,再利用三角化对目标特征点进行三维重构。根据标定的数据就可以得到目标特征点的空间坐标,结合相机的帧率实现对目标飞行线性速度的测量。

(3) 针对动态背景影响飞行目标的相似度评估问题,本文提出自适应相似度评估法来排除动态背景带来的影响,利用相似度信号的周期频率计算飞行目标

的滚转速度。该方法主要利用了自适应背景差法，在动态背景下完成对飞行目标的提取，从而排除背景因素对相似度评估的干扰，之后再利用数字图像相关算法对目标图像序列进行相似度评估。另外，本文还对比分析了两种周期计算方法，Chirp-Z 变换和基于抛物线插值的自相关法，实验表明，确定 Chirp-Z 变换法为本文的周期计算方法。

(4) 搭建了实物实验验证平台和模拟飞行目标发射装置对本文提出的测量方法和系统进行实验验证。首先验证了本文系统的拍摄效果，结果表明该系统的拍摄效果良好，能够对飞行目标进行跟踪拍摄，目标清晰且位于视野中央，满足后续分析计算的质量要求。另外，搭建了两套静态实验平台，对本文所提出的测量飞行目标线性位移和滚转速度的方法进行了精度验证以及影响因素分析，实验数据表明在正常光照条件下，测量目标位移的平均相对误差控制在 $\pm 1.5\%$ ，测量目标滚转速度的平均相对误差控制在 $\pm 0.65\%$ 以内。而对于影响因素的分析，实验结果表明光照强度、图像分辨率、目标位移量以及目标滚转速度的大小、相机帧率等因素都在不同程度上影响实验测量精度，在实际测量中需要根据实验成本、精度要求、实验环境等因素综合考虑，搭建最优测量平台。

6.2 展望

本文虽然在凝视跟踪系统、飞行目标参数测量、实验测试与评估方面做了一些工作，但是受限于实验条件以及作者本人的能力和时间，仍然存在几个问题需要更加深入的研究，许多工作需要进一步完善。主要内容如下：

(1) 本文搭建的扫描振镜跟踪测量系统对安装精度要求较高，尤其是扫描振镜与高速相机的位置关系，一旦安装位置存在偏差，飞行目标可能脱离振镜跟踪视野，相机视线无法与振镜转轴保持垂直导致对焦困难，图像模糊。因此，在后续的研究工作中重点考虑振镜控制算法和标定方法的优化。

(2) 本文的系统采用单振镜进行跟踪，所以只能实现平面内的拍摄测量，在实际应用中局限性较大。因此，在后续研究工作中考虑利用双振镜对目标进行跟踪拍摄，对目标进行三维重建，并设计相应的算法，更加全面地分析飞行目标运动学参数。

(3) 本文做了静态的实验精度验证以及实验环境影响因素分析，但是对于

动态的实际测量工作不够完善。因此，在后续的研究工作中重点考虑优化实验条件，搭建动态实验平台，对飞行目标进行实际拍摄测量，分析测量方法的适用性。

参考文献

- [1] 汪梦倩,梁皓星,郭茂耘,等.面向飞行目标的多传感器协同探测资源调度方法[J].自动化学报,2023,49(06):1242-1255.
- [2] 屈智星.高速低可探测飞行器的雷达探测技术研究[D].成都: 电子科技大学,2024.
- [3] 丁子瑞.数据-模型双驱动的空战目标意图推理算法研究[D].西安: 西安工业大学,2024.
- [4] 薛静云,李翰山,曾涛.多层破片战斗部对飞行目标毁伤概率计算方法[J].探测与控制学报,2022,44(03):57-60+67.
- [5] 杨晓亮.基于宽带三维电磁散射模型的飞行目标运动参数测量方法研究[D].长沙: 国防科技大学,2017.
- [6] 葛泉波,王远亮,李宏.基于改进舰尾流模型和多层耦合分析的机载雷达测量建模[J].自动化学报,2024,50(03):617-639.
- [7] Eager D, Hossain I M, Lindqvist L A, etc. City bus seat vibration analysis using 6-axis accelerometer and gyroscope sensors[J].Scientific Reports,2024,14(1):29865.
- [8] 荣吉利,杨梓航,周晓俊,等.陀螺加速度计精细化建模仿真方法研究[J].北京理工大学学报,2024,44(12):1233-1240.
- [9] Bian L X, Ma J, Zhang C, etc. Investigation on sensor layout of optical fiber distributed acoustic sensing technology for flow velocity measurement in pipes. IEEE Sensors Journal,24 (24), 41814-41824.
- [10] 曹海源,黎伟,冯苏茂.基于方位角测量的地面运动目标定位与精度分析[J].电光与控制,2023,30(04):105-110.
- [11] Zhang X, Wang S, Zhang R, etc. Research on the Improved Design and Implementation of Signal Processing and Detection Algorithm for High Speed Moving Target [C]//Lecture Notes in Electrical Engineering.2023,874 LNEE: 9-15.
- [12] 杜旺哲,陈康辉,李旭为,等.高温 H 型钢截面尺寸视觉测量方法研究[J].机械工程学报,2025,61(06):43-52.
- [13] Chi Y, Gao Y, Liu G, etc. Research on Vibration Displacement Measurement of Sleeper Based on Machine Vision [C]//Mechanisms and Machine Science.2024,152 MMS: 179-189.
- [14] Huang H, Kono D, Toyoura M. Vision based two-dimensional measurement of machine tool motion trajectory[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing,

2024,18(6):JAMDSM0080.

[15] 张俊.基于视觉的软体机器人运动测量与控制[D].江西:江西理工大学,2023.

[16] Jiang B, Zhang J, Yang X, etc. Research on the performance of distance measurement system based on binocular vision[C]//2024 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2024.2024:263-268.

[17] 张枫吟,李永新.基于双目视觉的水泥自动装车机车厢尺寸测量系统[J].传感器与微系统,2025,44(02):160-162,168.

[18] 李星领.基于双目视觉的目标检测跟踪与控制系统设计[D].大连:大连交通大学,2023.

[19] 周恺.基于振镜扫描的远距离大视场虹膜识别技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2019.

[20] 耿树巧.凝视跟踪测量系统关键技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2023.

[21] 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].芜湖:安徽工程大学,2023.

[22] 宋乐,路斯莹,侯宇鹏.单目三维视觉测量技术研究进展[J].传感技术学报,2024,37(03):365-380.

[23] Guedri B, Guedri N, Gharbi R. A New Approach for Real-Time Camera-Object Distance Measurement Through Computer Vision[C]//SCC 2023-IEEE 3rd International Conference on Signal, Control and Communication.2023,1-5.

[24] Ma W, Sun Y, Qi X, etc. Computer-Vision-Based Sensing Technologies for Livestock Body Dimension Measurement: A Survey. Sensors(Basel), 2024(5):1504.

[25] Marr D, Ullman S, Poggio T A. Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information[M]. The MIT Press, 2010.

[26] 张三喜,薛以辉,卢宇.狭缝摄影胶片图象运动参量测量和处理[J].光子学报,1999,(12):1117-1121.

[27] 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].长沙:国防科学技术大学,2014.

[28] 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.

[29] 马永忠,李其祥.对狭缝射影测弹丸转速方法的改进研究[J].弹箭与制导学报,2011,31(03):235-236.

[30] 史元元,冯斌,张文博,等.基于激光阴影照相系统的研究[J].应用光学,2020,41(02):282-287.

- [31] Zhang Y, Gao H, Sun Z, etc. The application study of shadow photography in measuring motion attitude of large caliber projectile[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2020,11427:J-6.
- [32] 谢爱民,黄洁,宋强,等.多序列激光阴影成像技术研究及应用[J].实验流体力学,2014,28(04):84-88.
- [33] 张文博.弹丸运动参数激光阴影照相测试技术研究[D].西安:西安工业大学,2019.
- [34] Wang W, Wang G J, Luo Z X, etc. Ultra-high speed laser shadow streak photography for flyer plates driven by magnetic fields[J]. Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engineering, 2012,20(5): 927-933.
- [35] 王天予,彭再云,梁修惠,等.基于多目机器视觉的城市轨道交通自动化监控系统设计[J].自动化与仪表,2023,38(12):1-5.
- [36] Huang D, Zhao Q, Ou Y, etc. Research on global calibration method for multi-camera visual measurement system[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering,2016:990334.
- [37] 王智捷,任健,廖磊.基于时空注意力机制和联合注意力的视觉凝视目标跟踪方法[J].微电子学与计算机,2022,39(11):45-53.
- [38] Ch Vidyasagar K E, Srimanth R M, Mahreen S, etc. Gaze Tracking Control System for Wheelchair and Smart Home Automation[C]//2023 IEEE 19th International Conference on Body Sensor Networks, BSN 2023 - Proceedings.2023:1-4.
- [39] Wang Y, Ding X, Yuan G. etc. Dual-Cameras-Based Driver's Eye Gaze Tracking System with Non-Linear Gaze Point Refinement[J]. Sensors, 2022,22(6):2326.
- [40] 蔡亲立,房明.基于机器视觉的自动识别追踪系统[J].科学技术创新,2024,(16):199-204.
- [41] 盖超会,高泽宇,王成刚,等.基于双轴运动水下探测机器人摄像云台系统设计[J].自动化与仪器仪表,2023,(08):277-280,285.
- [42] W.HB. Flight Follower 追踪系统[J].军民两用技术与产品, 2007(8):28-30.
- [43] Okumura K, Oku H, Ishikawa M. High-speed gaze controller formillisecond-order pan/tilt camera[C]//2011 IEEE International Conference onRobotics and Automation, 2011: 6186-6191.
- [44] 许子琪.大空间多振镜激光投影成像技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [45] 郭根.基于振镜扫描的激光频闪成像三维视觉测量技术研究[D].上海:上海交通大学,2018.

- [46] 吴迪.用于光片荧光显微的快速扫描成像系统研究[D].北京:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2015.
- [47] Shen T, Xie L, Luo J, etc. A Speed Measurement Method of Rail Transit Based on Millimeter-Wave Radar[C]//Lecture Notes in Electrical Engineering, 1042 LNEE, 169-181.
- [48] 王迪,王建飞,毛嘉琦,等.一种适用于门式车辆污染监测仪的雷达测速方案实现[J].中国测试,2023,49(S1):220-224.
- [49] 栗继伟,罗凯,尚甲豪,等.高超声速流场激光测速技术研究进展[J].力学学报,2024,56(04):890-914.
- [50] 白帆.基于压缩感知的激光雷达测速测距算法研究[D].成都:电子科技大学,2024.
- [51] 单良,简娟,熊俊哲,等.面向粒子图像测速的光流金字塔插值优化方法[J].光子学报,2024,53(03):160-173.
- [52] Schmidt B E, Jeffrey A S.Evaluation of a wavelet-based optical flow method for planar velocimetry using scalar fields[J].Experiments in Fluids,2022,63(3).
- [53] 李木国,杜海,邓姿.粒子测速系统中相位相关法的优化设计[J].计算机工程与应用,2007,(14):49-51.
- [54] 黄彪,孙馨喆.基于相位相关算法的运动目标速度测量方法的研究[J].国外电子测量技术,2021,40(04):110-113.
- [55] Zhang H, Tang Z, Xie Y, etc. RPI-SURF: A Feature Descriptor for Bubble Velocity Measurement in Froth Flotation with Relative Position Information[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021(70):1-14.
- [56] Cao L, Weitbrecht V, Li D, etc. Airborne Feature Matching Velocimetry for surface flow measurements in rivers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2021,59(4):637-650.
- [57] 赵亮,韩宝虎,孙魁元,等.基于累积图像特征点匹配的智能皮带测速方法[J].科学技术与工程,2021,21(12):4990-4994.
- [58] Du W, Lei D, Hang Z, etc. Short-distance and long-distance bridge displacement measurement based on template matching and feature detection methods[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2023,13(2-3): 343-360.
- [59] 陈晨,范春华,周彦良,等.惯性测量单元在自由泳运动员身体转动技术诊断中的应用[C]//中国体育科学学会.2024 年国际竞技体育生物力学论坛暨第二十三届全国运动生物力学学术交流大会论文摘要集.北京体育大学,中国游泳运动学院;南京体育学院,游泳学院江苏省游泳

队,2024:3.

[60] 雷一非,谢波,李淑英.激光陀螺捷联惯导系统旋转调制技术综述[J].导航与控制,2019,18(06):10-20,54.

[61] Shang J Y, Deng Z H, Fu M Y, etc. A High-Spin Rate Measurement Method for Projectiles Using a Magnetoresistive Sensor Based on Time-Frequency Domain Analysis[J]. Sensors, 2016,16(6):894.

[62] Huang W, Tong X, Mao Y, etc. FBG Sensor for Rotation Speed Measurement With Large Sensing Distance Based on Terfenol-D[J]. IEEE Sensors Journal, 23(6), 5786-5794.

[63] Li K, Li Y, Han Y. An EM induction hi-speed rotation angular rate sensor[J]. Sensors (Switzerland), 17(3):610.

[64] 史博,陈曦,李鹏斐,等.基于弹丸旋转规律的弹道终点辨识和引信全弹道安全控制方法[J].兵工学报,2024,45(09):3105-3113.

[65] 季云峰.基于人工智能的乒乓球旋转测量与推算[D].上海:上海体育学院,2018.

[66] Xu X, Shen Z, Zhao J, etc. Rotational motion estimation of non-cooperative target in space based on the 3D point cloud sequence[J]. Advances in Space Research, 2022,69(3):1528-1537.

[67] Zhong J F, Zhong S C, Zhang Q K, etc. Vision-based system for simultaneous monitoring of shaft rotational speed and axial vibration using non-projection composite fringe pattern[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018,67(06):1434-1445.

[68] Wang T, Yan Y, Wang L, etc. Rotational speed measurement through image similarity evaluation and spectral analysis[J]. IEEE Access, 2018(06):46718-46730.

[69] 向丽,张晓怀,陈兵.基于数字图像的空间目标滚转角测量方法[J].光电工程,2006,(10):84-90.

[70] Wang T, Wang L, Yan Y, etc. Rotational speed measurement using a low-cost imaging device and image processing algorithms[C]/I2MTC 2018-2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference: Discovering New Horizons in Instrumentation and Measurement, Proceedings, 2018:1-6.

[71] 王天宇.基于数字成像和图像处理的转速和振动测量研究[D].北京:华北电力大学(北京),2021.

[72] Zhang Z .A Flexible New Technique for Camera Calibration[J].IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.,2000,22(11):1330-1334.

- [73] 杨明斌.基于双目视觉运动恢复结构的温室植株三维重建与结构特征提取方法研究[D]. 深圳: 深圳大学,2022.
- [74] Faugeras O D, Lustman F. Motion and structure from motion in a piecewiseplanar environment[J]. International Journal of Pattern Recognition and ArtificialIntelligence, 1988, 2(03): 485-508.
- [75] 赵斌,孟祥印,肖世德,等.基于 GMA 光流网络的二维变形测量数字图像相关法初值估计[J].光学学报,2023,43(13):106-117.
- [76] 吴禄慎,吴益根.基于 ARM9 的自适应背景差法智能远程视频监控系统[J].仪表技术与传感器,2015,(11):81-84.
- [77] Aiello M, Cataliotti A, Nuccio S. A comparison of spectrum estimation techniques for nonstationary signals in induction motor drive measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005,54(6):2264-2271.

攻读学位期间发表的学术论文目录

[1]刘飞瑶,王力超,刘俊楠,等. 基于扫描振镜的飞行目标转速测量方法[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2024, 42(03):395-400.

致 谢

论文写到这，也就意味着我的硕士学业生涯即将告一段落，在这辛苦而又美好的三年时间里，有许多人对我的学业以及生活带来了帮助，在此对他们表示感谢！

感谢我的父母，父母永远都是我最坚实的后盾，在任何方面。

感谢我的导师和师母，王力超老师和耿树巧老师。王老师和耿老师对我研究生三年的学习帮助是不言而喻的，感谢你们的辛勤付出。另外，刘丙友导师、陶亮导师、万国扬导师和胡耀聪导师对我的论文都有一定的帮助，在此一并做出感谢。

感谢我的女朋友，在读研期间，对我的精神和情绪上提供了很大的支持。

感谢同组的同学和师兄姐妹们。李子阳、王义琼、董家辉、尚永健、程清扬、刘俊楠、缪陆、林腾飞、曹圣学、包俊涛、李彤彤、刘祥玉、汪冉、尹冰、黄志成、徐凯翔、戴洋、况暄等，以及我的室友，许瑞珩。感谢你们这三年的陪伴与指导。

纸短情长，对于本人表达的感谢之情，再多的感谢言语都显得苍白无力。希望在未来能够用自己的实际行动来回报大家的帮助。