

学校代号 10532
分类号 TU317+.4

学 号 S2101W0086
密 级 公开



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

基于无人机摄影测量的结构动态位移 测量方法研究

学位申请人姓名 张路遥
培 养 单 位 土木工程学院
导师姓名及职称 周云教授 谈忠坤教授级高工
学 科 专 业 土木水利
研 究 方 向 结构健康监测
论文提交日期 2024年5月20日

学校代号：10532

学 号：S2101W0086

密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

基于无人机摄影测量的结构动态位移 测量方法研究

国家自然科学基金（51878264，52278306）

湖南省交通运输厅科技进步与创新项目（201912）

湖南省重点研发计划项目（2022SK2096）

湖南省自然科学基金项目（2023JJ70003）

湖南省水利厅水利科技项目（XSKJ2023059-31）

学位申请人姓名：张路遥

导师姓名及职称：周云教授 谈忠坤教授级高工

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：土木水利

论文提交日期：2024年5月20日

论文答辩日期：2024年5月23日

答辩委员会主席：易伟建教授

**Research on dynamic displacement measurement methods of
structures based on unmanned aerial vehicles (UAVs)
photogrammetry**

by

ZHANG Luyao

B.E. (Wuhan University of Technology)2021

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Civil and Hydraulic Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisors

Professor ZHOU Yun, Senior Engineer TAN Zhongkun

May, 2024

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本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，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南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。

本学位论文属于

- 1、保密□，在____年解密后适用本授权书。
- 2、不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分，是促进国民经济发展和推动社会进步的重要保障。我国桥梁建设成果显著，在桥梁数量、规模、建设运维技术等方面均取得了巨大进步，是世界桥梁建设的引领者。与此同时，日益增大的交通流和频繁超载等因素的长期作用下，桥梁结构损伤和性能退化加剧，导致其承载能力和耐久性逐渐降低，桥梁坍塌事故时有发生。桥梁在服役期限内的安全运营面临着极大挑战。针对我国中小型桥梁量大面广的分布特点，传统的基于人工和接触式传感器的桥梁检测方法存在运营成本高、效率低、风险大、阻碍交通等问题，难以满足当下体量庞大的检测需求。为实现低成本、轻量化的中小型桥梁检测，本文围绕桥梁的变形检测，利用无人机和机器视觉技术开展了结构位移和位移影响线的测量方法研究。以下是本文的主要研究内容：

(1) 根据无人机(UAV)悬停时的位移漂移规律，提出了一种基于单目无人机的结构动态位移测量方法。该方法首先采用数字图像相关(DIC)算法并基于背景不动点理论消除无人机平面内的位移漂移；然后基于ArUco标靶提取自适应尺度因子消除无人机平面外的位移漂移；最后基于对称背景不动点修正空间几何误差，进而得到结构目标平面的绝对位移。通过实验室钢框架模型试验验证所提方法的测量精度并测试了不同测距下所提方法的鲁棒性。将测量结果与激光位移计进行对比，结果表明所提方法具有高精度和稳定的优势。

(2) 结合桥梁变形检测的实际需求，为克服单目无人机的视场局限以及远距离测量桥梁位移时精度下降的问题，提出了一种基于无人机载双相机的结构动态位移测量方法。该方法使用无人机搭载同轴双相机，通过长焦相机测量无人机相对测点的位移；通过广角相机测量无人机相对背景不动点的位移；最后根据双相机的标定结果，直接将广角相机计算结果从长焦相机中减去得到结构测点的绝对位移。通过室外钢框架模型试验和野外实际桥梁试验验证所提方法的测量精度，将测量结果与固定相机对比，结果表明所提方法能够准确测量结构动态位移，具有工程应用前景。

(3) 位移影响线(IL)是桥梁结构状态评估的重要指标。为实现“无需接触式传感”、“无需封闭交通”、“无需车辆称重系统(WIM)”的智能桥梁检测，提出了一种融合机器视觉与区间仿射算法的桥梁结构影响线实测方法。首先基于机器视觉技术采用固定相机获取多工况的桥梁测点动态位移响应；其次，根据车辆出厂信息建立车辆轴重区间矩阵并通过区间仿射算法计算多工况的影响线区间；最后，采用支持向量机(SVM)从影响线区间中识别桥梁真实影响线。将该方法应用于野外实际桥梁试验，通过控制标定车辆的载重和行驶速度获取多工况的位移响应数据以评估该方法的性能。结果表明，该方法能够有效地从影响线区间中识

别桥梁真实影响线，具有工程应用价值。

关键词：非接触式测量；桥梁结构；机器视觉；无人机；动态位移；位移影响线

Abstract

Bridges serve as indispensable components of transportation infrastructure, playing a pivotal role in driving national economic development and fostering social progress. China has achieved remarkable milestones in bridge construction, witnessing significant advancements in terms of quantity, scale, construction techniques, and maintenance technology, thereby establishing itself as a global leader in this domain. However, with the increasing traffic flow and persistent overloading, the long-term effects have exacerbated bridge structural damage and performance degradation, resulting in reduced load-bearing capacity and durability. Bridge collapse accidents occur frequently, posing significant challenges to the safe operation of bridges during their service life. Traditional bridge inspection methods based on manual labor and contact sensors face challenges such as high operating costs, low efficiency, high risks, and traffic disruption, making it difficult to meet the current massive inspection demands, especially for small and medium-sized bridges distributed widely across China. To achieve low-cost and lightweight inspection of small and medium-sized bridges, this study focuses on deformation detection and conducts research on structural dynamic displacement and displacement influence line measurement based on machine vision technology. The main research contents are as follows:

(1) Based on the displacement drift law of unmanned aerial vehicle (UAV) during hovering, a method for measuring dynamic displacement of structures based on monocular UAV is proposed. This method first utilizes digital image correlation (DIC) algorithm and background stationary point theory to eliminate displacement drift within the plane of the UAV; then, it utilizes ArUco markers to extract an adaptive scale factor to eliminate displacement drift outside the plane of the UAV; finally, it corrects spatial geometric errors based on symmetric background stationary points to obtain the absolute displacement of the structural target plane. The measurement accuracy of the proposed method is validated through laboratory steel frame model experiments, and the robustness of the proposed method under different measurement distances is tested. Comparisons with laser displacement meters show that the proposed method has the advantages of high accuracy and stability.

(2) Combining the practical requirements of bridge deformation detection, a method for measuring dynamic displacement of structures based on UAV dual cameras is proposed to overcome the limitations of monocular UAV field of view and the decrease in accuracy when measuring bridge displacement at long distances. This

method utilizes UAV equipped with coaxial dual cameras, where the telephoto camera measures the displacement of the UAV relative to the measuring point and the wide-angle camera measures the displacement of the UAV relative to background stationary points. Finally, based on the calibration results of the dual cameras, the absolute displacement of the structural measuring points is directly obtained by subtracting the wide-angle camera results from the telephoto camera results. The measurement accuracy of the proposed method is validated through outdoor steel frame model experiments and field tests on actual bridges. Comparisons with fixed cameras show that the proposed method can accurately measure structural dynamic displacement and has promising engineering applications.

(3) Displacement influence line (IL) is an important indicator for evaluating the structural condition of bridges. To achieve intelligent bridge detection without the need for contact sensors, closed traffic, or WIM, this paper proposes a measurement method for bridge ILs that integrated machine vision and the interval affine algorithm. This method first employs machine vision to initially capture dynamic displacement responses of bridge measurement points under various testing cases. Subsequently, a vehicle axle load interval matrix is established based on the vehicle's factory information, and IL interval under multiple testing cases is calculated using the interval affine algorithm. Finally, a support vector machine (SVM) is utilized to identify the actual bridge IL from the IL interval. The effectiveness of this method is demonstrated through a real bridge test, where the performance is evaluated by controlling the load and travel speed of the calibration vehicle to obtain displacement response data under different testing conditions. The results indicate that this method can accurately identify the real bridge IL from the IL interval, demonstrating its engineering application value.

Key Words: Non-contact measurement; Bridge structure; Machine vision; Unmanned aerial vehicle; Dynamic displacement; Displacement influence line

目 录

学位论文原创性声明	I
摘要	II
Abstract	IV
插图索引	VIII
附表索引	XI
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 常用的机器视觉位移测量算法	5
1.2.2 基于机器视觉技术的桥梁位移实测研究现状	9
1.2.3 基于无人机的桥梁位移测量研究现状	10
1.2.4 基于机器视觉技术的桥梁影响线测量研究现状	11
1.3 本文研究内容	13
1.3.1 选题依据	13
1.3.2 主要研究内容	13
第 2 章 数字图像相关法位移测量理论基础	15
2.1 引言	15
2.2 数字图像相关法测量系统组成	15
2.3 数字图像相关法基本原理	17
2.3.1 子区形函数的选择	17
2.3.2 相关函数的选择	18
2.3.3 整像素位移搜索算法	20
2.3.4 亚像素位移搜索算法	21
2.4 相机标定方法	25
2.4.1 一般相机标定法	25
2.4.2 单应性矩阵法	26
2.4.3 尺度因子法	27
2.5 本章小结	27
第 3 章 基于单目无人机的结构动态位移测量	29
3.1 引言	29
3.2 无人机悬停位移漂移规律	29
3.3 无人机平面内位移补偿	30
3.4 无人机平面外位移补偿	30

3.5 空间几何误差修正	33
3.6 实验室钢框架模型试验验证	34
3.6.1 实验室钢框架模型试验概况	34
3.6.2 实验室钢框架模型试验精度验证	35
3.6.3 测量距离对精度的影响	42
3.7 本章小结	48
第 4 章 基于无人机载双相机的结构动态位移测量	49
4.1 引言	49
4.2 基于双相机的无人机空间位移漂移补偿	49
4.3 室外钢框架模型试验	51
4.3.1 室外钢框架模型试验概况	52
4.3.2 室外钢框架模型试验结果分析	53
4.4 野外实际桥梁试验	57
4.4.1 野外试验概况	57
4.4.2 野外试验结果分析	58
4.5 本章小结	59
第 5 章 融合机器视觉与区间仿射算法的影响线实测	60
5.1 引言	60
5.2 影响线识别原理及方法	60
5.2.1 影响线识别模型	60
5.2.2 基于机器视觉技术的桥梁结构动态位移测量（模块 1）	62
5.2.3 基于区间仿射算法的影响线区间计算（模块 2）	63
5.2.4 基于支持向量机的影响线识别（模块 3）	64
5.3 野外试验	66
5.3.1 试验概况	66
5.3.2 测试结果分析	67
5.4 本章小结	71
结论与展望	72
参考文献	74
附录 A（攻读学位期间所发表的学术论文）	84
致谢	85

插图索引

图 1.1 我国桥梁总数与危桥数量统计	1
图 1.2 桥梁垮塌事故案例	2
图 1.3 数字图像相关模板匹配法追踪 ^[5]	6
图 1.4 特征点匹配法追踪 ^[5]	7
图 1.5 光流法追踪	8
图 1.6 基于形状的匹配法追踪	8
图 1.7 深度学习法追踪	8
图 1.8 国家自然科学基金研究内容	13
图 2.1 基于 DIC 法的结构位移测量系统	15
图 2.2 机器视觉结构位移测量数码相机类型	16
图 2.3 DIC 法位移测量基本原理	17
图 2.4 二元二次多项式曲面拟合示意图	21
图 2.5 双三次立方插值法示意图	22
图 2.6 相机成像针孔模型	26
图 2.7 单应性矩阵法相机标定	26
图 2.8 尺度因子法相机标定	27
图 3.1 无人机悬停时的位移漂移规律	29
图 3.2 无人机平面内位移补偿原理	30
图 3.3 无人机平面外位移补偿原理	31
图 3.4 ArUco 编码及其检测效果	32
图 3.5 空间几何误差修正示意图	33
图 3.6 基于单目无人机的结构动态位移测量方法流程图	34
图 3.7 实验室钢框架模型试验装置	35
图 3.8 实验室钢框架模型试验拍摄视角	35
图 3.9 基于数字图像相关法的相对位移计算	36
图 3.10 图像坐标系下角点坐标示意	36
图 3.11 目标标靶角点坐标检测	37
图 3.12 目标标靶的尺度因子	37
图 3.13 无人机 Z 向平面外位移	38
图 3.14 背景标靶的尺度因子验证	38
图 3.15 目标标靶的绝对位移	39
图 3.16 对称背景点 ROI 区域选取	39

图 3.17 空间几何误差修正后的结构绝对位移	40
图 3.18 位移测量结果对比	41
图 3.19 不同方法的测量结果对比	41
图 3.20 两种测距下的无人机视角	42
图 3.21 两种测距下的相对像素位移	43
图 3.22 两种测距下的目标标靶尺度因子	43
图 3.23 两种测距下的背景标靶尺度因子	44
图 3.24 两种测距下的目标标靶绝对位移	45
图 3.25 修正后的两种测距下的目标标靶绝对位移	45
图 3.26 3m 测距下位移测量结果对比	46
图 3.27 5m 测距下位移测量结果对比	47
图 4.1 双相机系统测量原理	49
图 4.2 双相机无人机系统	50
图 4.3 某时刻双相机标定角点检测和重投影情况	51
图 4.4 双相机标定重投影误差	51
图 4.5 室外钢框架模型试验装置	52
图 4.6 室外钢框架模型试验拍摄视角	52
图 4.7 长焦镜头拍摄待测结构结果	54
图 4.8 广角镜头拍摄背景不动点结果	55
图 4.9 待测结构绝对位移	56
图 4.10 所提方法与固定相机结果对比	56
图 4.11 长沙市洪山桥	57
图 4.12 野外试验测量系统	57
图 4.13 野外试验拍摄视角	58
图 4.14 野外试验位移测量结果	58
图 5.1 影响线实测方法框架	60
图 5.2 单位影响线分解	61
图 5.3 FTCC 算法流程	63
图 5.4 支持向量机二分类	66
图 5.5 桥梁示意图	67
图 5.6 动态位移测量系统	67
图 5.7 标定车辆	67
图 5.8 M13-30 静态位移响应	68
图 5.9 桥梁跨中测点位移响应	68
图 5.10 各工况影响线识别结果	70

图 5.11 桥梁跨中测点静态基准影响线	70
图 5.12 影响线识别结果对比	70

附表索引

表 1.1 近年来典型桥梁事故	2
表 1.2 常用的接触式位移测量方法	3
表 1.3 常用的非接触式位移测量方法	4
表 1.4 主流追踪算法及其特点	5
表 2.1 CCD 相机与 CMOS 相机性能对比	16
表 2.2 常用的相关函数	18
表 3.1 不同方法的测量误差对比	42
表 3.2 不同测距下测量误差对比	48
表 5.1 计算参数	69

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

近年来,我国基础设施建设不断完善,城市化进程加快,国民经济飞速发展。桥梁作为连接城市交通网络的关键枢纽,不仅是国民经济和生活的关键支撑,也是城市发展的支柱和基石。据我国交通运输部数据显示^[1],截至2022年末,全国公路桥梁103.32万座,总里程8576.49万延米。其中中小型桥梁占比约为83.70%,助力我国公路总里程位居世界首位。然而,我国的桥梁建设主要集中在近20-30年间,平均以每年2~3万座的数量不断增加,目前我国公路路网中超过40%的桥梁服役时间在20年以上,桥梁的安全运营面临严峻挑战。据不完全统计,图1.1显示了近20多年间我国公路桥梁总数与危桥数量的变化趋势^[2],尽管危桥数量近年来在交通运输部开展的公路危旧桥梁改造行动中得到有效抑制,但随着同期桥梁建设规模的飞速发展,集中建设的大规模桥梁未来势必会给我国带来日益增长的桥梁检修压力。

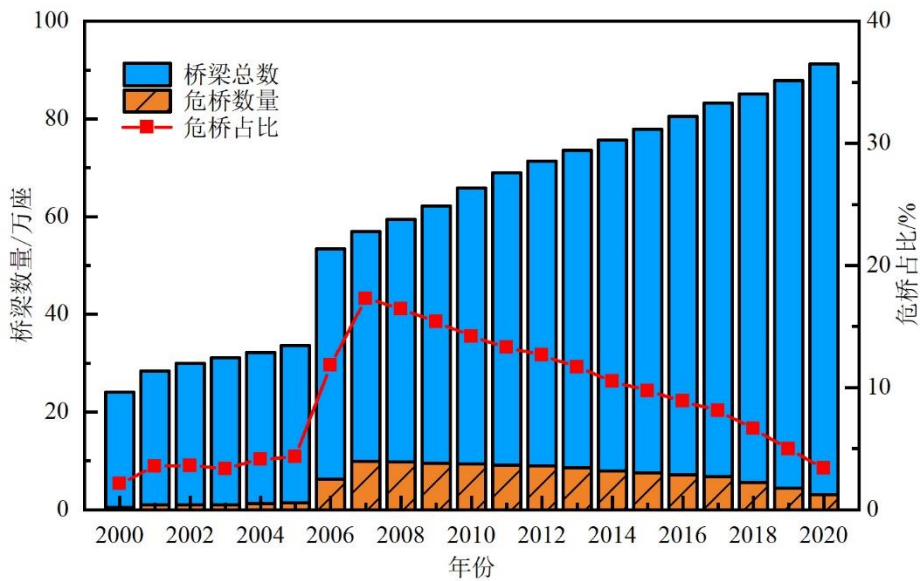


图 1.1 我国桥梁总数与危桥数量统计

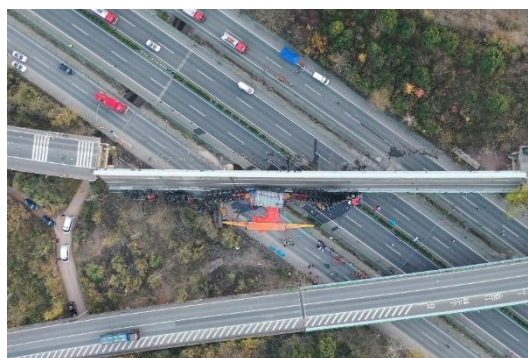
桥梁安全在社会和经济发展中扮演着至关重要的角色,直接关系到国计民生。在桥梁服役期间,由于结构初始设计缺陷、施工质量差、结构构件老化、环境侵蚀、车船撞击和交通超载等因素导致桥梁事故频发,给人民的生命和财产安全造成了巨大损失^[3,4]。表 1.1 列出了近年来典型的桥梁事故发生原因及其造成的人员伤亡情况,部分桥梁坍塌事故如图 1.2 所示。

表 1.1 近年来典型桥梁事故

事故发生时间	事故名称	事故发生原因	人员伤亡情况
2011年7月14日	福建武夷山公馆大桥断裂坍塌	重型货车超载	1死22伤
2013年2月1日	河南义昌大桥爆炸坍塌	运输烟花爆竹车辆爆炸	10死11伤
2015年6月19日	粤赣高速匝道桥断裂坍塌	多辆货车超载	1死4伤
2018年8月14日	意大利莫兰蒂大桥局部桥段坍塌	构件老化和腐蚀	43死9伤
2019年10月10日	江苏无锡高架桥侧翻	货车超载	3死2伤
2020年11月1日	天津滨海铁路桥坍塌	维修时违规操作	8死6伤
2021年12月18日	鄂州高速公路桥面垮塌	货车超载	4死8伤
2022年10月30日	印度古吉拉特邦莫尔比电缆桥倒塌	桥面负载超载	141死
2023年7月6日	恩广高速达万段部分桥面垮塌	山体崩塌冲毁桥墩	3伤
2024年2月22日	广州南沙沥心沙大桥垮塌	船撞桥墩	5死2伤



a) 福建武夷山公馆大桥



b) 鄂州高速公路桥



c) 意大利莫兰蒂大桥



d) 印度古吉拉特邦莫尔比电缆桥

图 1.2 桥梁垮塌事故案例

桥梁作为连接我国现代化交通建设的“咽喉”，一旦发生事故将会给国民和社会带来严重损失。结构健康监测可实时追踪、深入分析及精准识别桥梁服役期间的各项响应，进而全面评估桥梁性能与安全状态，在保障桥梁安全、延长结构寿命和提高应急响应能力等方面发挥着重要的作用。位移监测作为结构健康监测

的重要组成部分，发挥着不可或缺的作用。位移数据能够换算得到结构的挠度、变形、承载力以及影响线等关键参数，进而全面评估桥梁服役状态，确保其安全稳定地运营^[5]。

传统的结构位移测量方法主要分为接触式和非接触式两类。表 1.2 和表 1.3 分别给出了常用的接触式和非接触式位移测量方法及其优缺点。由表可知，传统的结构位移测量方法在成本、精度和工程应用价值等方面均具有不同程度的局限性，亟需开发高精度、低成本、轻量化的新型结构位移测量方法。

表 1.2 常用的接触式位移测量方法

序号	名称	优点	缺点
1	机械式百分表和千分表	精度高、成本低、灵敏度高、操作简单	量程有限、精度易受环境和磨损程度影响、需要设置固定支撑，桥梁工程应用前景受限 ^[6]
2	拉绳式位移传感器	精度高、稳定性好、操作简单、应用广泛	不适用于测量弯曲位移和大位移、需要设置固定支撑
3	磁致伸缩位移传感器	过载能力强、环境适应性强、使用寿命长、性价比较高	输出具有非线性、精度有限、需要设置固定支撑
4	线性可变差压传感器	精度高、灵敏度高、低滞后、耐用且使用寿命长、可重复性出色	需要设置固定支撑、对安装平面要求高、不适用动态位移测量
5	电阻应变式传感器	精度高、稳定性好、灵敏度高、操作简单	对温度敏感、易受磁场干扰、响应速度较慢，不适用动位移测量
6	电感式传感器	精度高、灵敏度高、抗干扰能力强	响应较慢，不适用动位移测量、存在温度漂移、易受磁场干扰
7	连通管测量	原理简单、操作简单	位移响应较慢且存在峰值削减
8	加速度传感器	操作简单、动态响应好、适用性强	需要二次积分 ^[7] ，漂移和噪声误差大，精度不高 ^[8]

表 1.3 常用的非接触式位移测量方法

序号	名称	优点	缺点
1	全站仪	操作简单、精度较高	需安装棱镜、采样频率低、成本高、不适用于动态位移测量
2	激光多普勒仪	近距离测量精度高	成本昂贵、需安装反光原件 ^[9] 、不适用于远距离测量
3	微波雷达测量	精度高、可多点测量	测点布置不灵活，噪声影响大 ^[10]
4	全球定位系统 GPS	可全天候观测	测量精度较低，采样频率低、一般用于大跨柔性桥梁监测 ^[11,12]
5	散斑干涉法		
6	全息干涉法	精度高、灵敏度高	易受光照变化影响
7	云纹干涉法		
8	激光位移计	精度高、采样频率高	量程小、需固定在待测结构附近
9	机器视觉测量法	精度高、操作简单、成本较低、可多点实时测量	精度受测距影响

随着计算机技术的兴起与发展，机器视觉测量方法凭借其成本低、非接触、精度高以及能够多点监测等优势，在土木工程领域被广泛应用^[13~15]。该方法首先利用相机等图像采集设备获取被测结构的运动图像序列，然后经图像处理技术提取被测结构的特征信息并追踪其像素位移，最后通过相机标定建立图像坐标与世界坐标的几何关系，将像素位移转化成被测结构的实际位移。目前基于机器视觉技术的结构位移测量方法已经被应用于桥梁挠度测量^[16]、承载力评估^[17]、损伤诊断^[18]、模态分析^[19]、索力监测^[20]和桥梁动态称重^[21]等多项任务。然而，机器视觉方法的测量精度与测距成反比，在实际桥梁位移监测中可能会出现相机架设点距离结构较远的情况导致测量精度下降。

无人机摄影测量有效弥补了固定相机视觉测量的局限，它可以近距离悬停在被测结构附近对桥梁进行安全高效地检测。然而，无人机作为一种动态飞行平台在测量结构位移时会受到自身基点运动干扰，如何从采集到的位移曲线中消除无人机的基点运动获取被测结构的绝对位移是具有挑战性的问题。本文结合机器视觉和无人机技术研究了一种新型的桥梁动态位移测量方法，总结了使用单目无人机和无人机电载双相机进行结构动态位移测量的两种模式，并进一步提出了融合机

器视觉和区间仿射算法的桥梁结构位移影响线测量方法，以期为桥梁结构动态位移和位移影响线的测量领域发展添砖加瓦。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 常用的机器视觉位移测量算法

表 1.4 列出了机器视觉位移测量领域的 5 种主流追踪算法及其特点。下面逐一介绍每种算法的国内外研究现状。

表 1.4 主流追踪算法及其特点

算法名称	特点
数字图像相关模板匹配法	精度高、适用面广、原理简单
特征点匹配法	对旋转和尺度变化适应性强
光流法	小位移测量精度高、计算量大
基于形状的匹配法	远距离测量精度较差
深度学习法	多为像素级识别、精度不高

(1) 数字图像相关模板匹配法：数字图像相关模板匹配法基于图像中的模板与目标图像中的局部区域进行匹配，从而实现位移的测量，如图 1.3 所示。其基本原理和步骤是：首先在参考图像中选择一个在不同图像帧中都能清晰识别的模板，通常是一个小区域的图像块，其特征在不同帧之间能够保持稳定；然后在目标图像中搜索与模板匹配度最高的区域，常用的匹配方法包括均方差匹配、相关性匹配和归一化互相关等；最后通过比较模板在参考图像和目标图像中的位置计算像素位移，通常以模板中心的偏移量来估计。

1993 年，Stephen 等^[22]开发了基于模板匹配法的视觉位移系统，采用并行处理技术测量了多个目标的位移响应。Fukuda 等^[23]基于模板匹配原理提出了一种鲁棒性强的目标搜索算法，通过跟踪结构自然特征实现了精确位移测量，并验证了该算法在远距离位移测量中的有效性。陈昌川等^[24]基于频域数字图像相关法，利用相位相关原理实现了结构微小位移测量。Feng 等^[14]开发了一种基于上采样互相关模板匹配原理的视觉位移系统，通过实验室试验和野外桥梁试验证明了该系统具有较高精度。周云等^[25]采用数字图像相关模板匹配算法对钢框架结构模型开展位移测试，实现了毫米级位移测量。针对不同的应用场景，数字图像相关模板匹配算法可分为空间域^[26~28]和频域^[29~31]两大类，运用傅里叶变换将空间域图像转化为频域图像，可以简化计算程序，提高计算效率。

传统的数字图像相关模板匹配算法在实际应用中存在诸多限制和挑战。相机的不稳定性、结构特征、光照条件和模板大小选择等因素都会对算法的准确性和稳定性造成影响，且通常需要对整幅图像进行搜索，计算复杂程度较高，导致匹

配速度较慢，效率较低。为此，相关学者对数字图像模板匹配法进行了一系列改进。Xiu 等^[32]优化了目标识别算法，将图像差分与模板匹配相结合，提高了算法的鲁棒性，实现了复杂背景下的目标检测。张彩珍等^[33]提出了一种融合帧差法和模板匹配法的目标识别算法，采用形态学方法进行图像跟踪效果增强，结果证明该方法能够在目标被遮挡的情况下依然有效地跟踪目标。Yan 等^[34]提出了一种多特征融合的目标跟踪算法，增强了目标匹配的鲁棒性，解决了颜色干扰或目标遮挡情况下跟踪不稳定的问题。此外，为满足测量精度要求，数字图像相关模板匹配法通常需要优化搜索，实现亚像素级别测量。常用的亚像素处理方式主要有灰度插值法、曲线拟合法、相位相关插值法以及空间梯度法等^[35~38]。

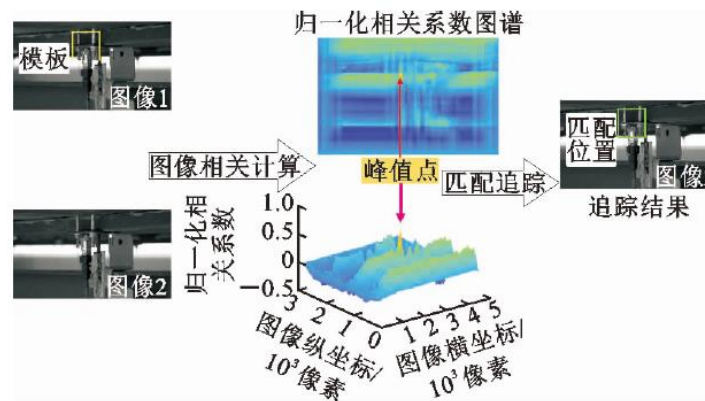


图 1.3 数字图像相关模板匹配法追踪^[5]

(2) 特征点匹配法：特征点匹配算法是一种在图像中检测并匹配显著特征点的技术，通常用于定位、跟踪或配准目标，其追踪过程如图 1.4 所示。以下是特征点匹配算法的基本原理和步骤：1) 特征点检测：特征点通常是在局部区域内具有显著变化的点，如角点、边缘点或纹理点等，常用的特征检测算法包括 Harris 角点检测^[39]、SIFT^[40]角点检测、SURF^[41]角点检测和 FAST^[42]角点检测等。2) 特征描述：对于每个检测到的特征点，计算其局部区域的描述子。其中，描述子是对特征点周围像素的数值表示，用于描述特征点的外观和结构特征。常用的描述子包括 SIFT 描述子^[40]、SURF 描述子^[41]和 ORB 描述子^[43]等。3) 特征匹配：将一个图像中的特征点与另一个图像中的特征点进行匹配。匹配准则通常根据描述子的相似度来确定，如欧几里得距离^[40]和海明距离^[43]。4) 异常匹配剔除：对匹配结果的质量进行筛选和验证，以去除错误匹配点。常见的筛选方法包括基于单应性矩阵变换的随机抽样一致法和最小平方中值法等^[44]。

Song 等^[45]基于 Hough 变换从图像序列中提取亚像素精度特征点来跟踪目标位移，在实验室悬臂钢梁试验中验证了该方法的测量精度。Khuc 等^[16]在 2016 年采用 SIFT 特征点和描述子测量了列车荷载下高架桥的动位移，同时提出了一种无需人工标记的相机标定方法，该方法能够有效提高结构检测效率。而后在 2017 年，该团队又基于改进的 Harris 角点检测算法和 FREAK 描述子搭建了一套结构

非接触式健康监测框架，实现亚像素级别位移测量^[46]。Hu 等^[47]利用 ORB 特征点和描述子提出了一种优化的目标匹配算法，无需人工标志物，在不封闭交通的条件下准确测量了公交高架桥的位移响应。

特征点匹配算法不同于模板匹配算法，它针对稀疏点而不是整个区域进行匹配计算，具有较高的计算效率，经平均后得到的位移具有亚像素精度。由于特征点通常对光照变化、部分遮挡和视角变化具有一定的鲁棒性，因此特征点匹配算法在应对复杂场景时表现较为稳健。部分特征点匹配算法还具有旋转和尺度不变性，在不同尺度下仍能够匹配相似的特征点。然而，特征点匹配算法通常只能提取局部特征，对于全局信息不敏感，因此在处理具有复杂纹理或结构的图像时可能表现不佳，且该类算法的性能依赖于参数的选择，使得测量结果具有较大不确定性。

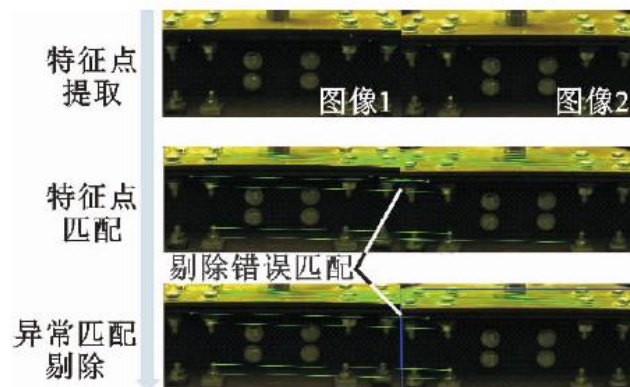


图 1.4 特征点匹配法追踪^[5]

(3) 光流法：光流法的基本原理是利用相邻帧之间的像素亮度值的变化来推断像素的运动情况，如图 1.5 所示。光流法的应用基于两个基本假设^[48]：亮度不变假设和小运动假设，即假设相邻帧中的像素周围亮度不变且运动足够小。在土木工程领域应用较多的主流光流算法主要是 Lucas-Kanade 光流法（LK 光流法）^[49]和基于相位的光流法^[50]两类。其中 LK 光流法需要增加假设：假定相邻像素光流运动一致^[51]。基于相位的光流法另需满足相位局部相位守恒的假定。

光流法的小运动假设导致该方法在测量结构大位移时误差较大，故相关学者对其进行了一系列改进。夏婷等^[52]将金字塔法引入光流法，降低该算法在测量大位移时的误差。Yoon 等^[53]结合了 LK 光流法和 Shi-Tomasi 特征点识别算法，使用 RANSAC 剔除错误的特征点，对柔性钢架实现了结构位移测量。周颖等^[54]将 LK 光流法与 SIFT 特征点识别算法相结合，实现了对小型钢框架结构的结构识别。Khaloo 等^[55]采用了四种不同的光流算法对结构位移进行测量，并针对测量结果对比分析了各算法的优劣。Chen 等^[56]将运动放大技术与光流法相结合，实现了对结构微小位移的测量。

光流法在位移估计中采用了最小二乘法 and 梯度运算，实现了亚像素精度级的

位移测量。但由于其假设相邻帧中的像素周围的亮度不变，因此对于光照变化较大的场景和一些快速、复杂的运动场景下可能不稳定。

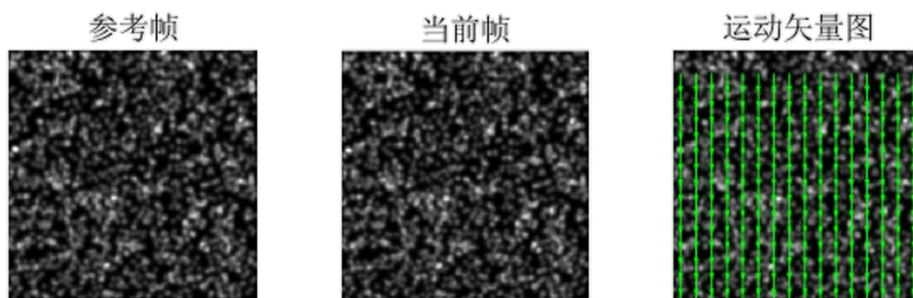


图 1.5 光流法追踪

(4) 基于形状的匹配法：基于形状的匹配法的基本原理是通过比较目标形状的几何特征与待匹配图像中的区域进行匹配，从而实现目标检测、识别和跟踪，如图 1.6 所示。具体步骤如下：首先从待匹配图像中提取目标形状的几何特征，如边缘曲线、轮廓曲线和结构上特殊的规则几何形状等；然后将提取的形状特征与目标形状模型进行比较，寻找与目标形状最匹配的候选区域；最后通过定位每帧图像的几何图形的形心完成目标追踪。基于形状的匹配法适用于室内近距离位移测量，利用几何匹配的尺度变化可以实现面外位移的测量^[57]。目前该类方法在工业检测中应用较多，但在土木工程结构监测领域应用具有一定的局限性^[13]。



图 1.6 基于形状的匹配法追踪

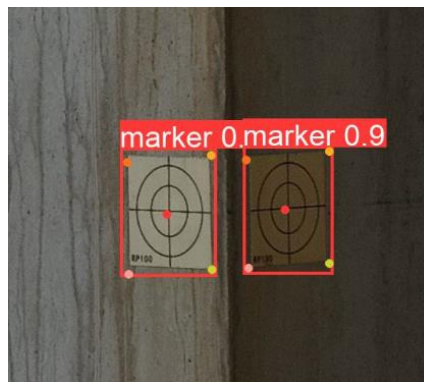


图 1.7 深度学习法追踪

(5) 深度学习法：基于深度学习的目标追踪算法通过搭建卷积神经网络和训练目标跟踪数据库实现复杂背景下的准确目标追踪，如图 1.7 所示。目前主流的追踪方法主要基于 Siamese 类型框架，例如 Siamese FC^[58]、Siamese Mask^[59]和 Siamese RPN++等^[60]。随着深度学习技术的发展，该类算法的目标追踪性能进一步优化并逐渐成为主流算法^[61]。但这种方法需要人工标记大量的数据集来训练模型，且得到的模型通常较大，算法后处理时间长，计算的位移多为像素级，难以适用于对测量精度要求高的场景。

综上所述，随着计算机技术的飞速发展，机器视觉位移追踪算法成为国内外学者研究热点，算法性能被不断优化。其中，数字图像相关模板匹配法以其高精

度、高效率和高环境普适性等优点被广泛运用于土木工程中的多个研究领域。

1.2.2 基于机器视觉技术的桥梁位移实测研究现状

近年来,研究人员基于机器视觉技术开展了诸多桥梁位移测量研究,这类方法已经在实际桥梁试验中被验证满足测量精度要求。

2013年, Ye 等^[8]基于归一化相关系数的数字图像相关模板匹配法开发了一套动态位移测量系统,使用高分辨率的工业相机采集数字图像并进行互相关分析,从而计算结构位移。将该系统用于青马大桥(主跨 1377 m 的悬索桥),测量其在交通荷载作用下的位移,结果证明能够达到毫米级测量精度。

2017年, Feng 等^[62]将固定相机视觉位移传感器分别用于实验室简支梁试验和曼哈顿大桥现场试验。结果证明,实验室条件下测得的位移结果具有较高精度,计算的固有频率和振型与加速度传感器数据能够很好吻合。然而在野外实际桥梁试验中由于相机假设距离较远,比例因子、测量分辨率和视场大小等参数都将对测量结果产生影响,需要进一步权衡。

2021年, Yu 等^[63]提出了针对大型桥梁的多点挠度测量方法。将摄像机安装在桥下,通过对桥梁灯光的追踪计算图像缩放系数,从而补偿相机自身振动的干扰。通过室内试验和野外大跨度斜拉桥现场试验,验证了所提位移测量方法的有效性和灵活性,具有工程应用前景。

2021年, Xu 等^[64]将深度学习与模板匹配法相结合,强化了特征表示并考虑模板随时间的自适应更新,提出了一种抗光照变化的结构位移测量方法。通过室内实验室试验和室外人行天桥以及大跨度公路桥试验,验证了所提方法能够在部分遮挡和照明变化的复杂场景下实现位移测量。

2022年, Wu 等^[65]通过对激光条纹的跟踪测量桥梁振动,得到桥梁的位移时程曲线并识别其动力参数。所提方法有效解决了传统视觉方法对目标和光照的强依赖问题,经室内简支梁试验和野外轨道梁现场试验验证了其测量精度,为桥梁振动信号的非接触测量提供了新思路。

2023年, Du 等^[66]将模板匹配法与特征点匹配法相结合,弥补了传统模板匹配法 ROI 区域依赖主观经验的局限,得到了满足工程规范化的理想尺寸。将该方法应用于高铁桥和斜拉桥试验,结果表明所提方法可以实现近距离和远距离位移监测,测量精度可达毫米级。

上述研究证明基于机器视觉的桥梁位移测量具有广阔的工程应用前景,但仍然存在缺陷。一方面对于跨江跨河的桥梁来说,难以找到适合的相机架设点,通常只能架设在岸边倾斜拍摄,影响测量精度;另一方面对于实际桥梁来说,测点距离相机较远,然而相机分辨率是一定的,从而导致图像的尺度比例因子较大,再加上大气干扰等因素的影响,测量结果往往难以达到理想的精度要求。

1.2.3 基于无人机的桥梁位移测量研究现状

随着无人机技术的发展,无人机在桥梁健康监测中的应用愈发广泛,为结构位移测量领域提供了全新的视角和解决方案。无人机搭载高清镜头可以贴近测点采集桥梁运动视频,有效解决了固定相机在实际桥梁测量中测距较远的问题。但无人机在悬停拍摄时并非绝对静止,机身会不可避免地发生晃动,导致测量结果中包含了无人机自身基点运动,限制了无人机在桥梁位移测量领域的应用。针对无人机自身振动剔除问题,近年来国内外学者开展了一系列研究。

2018年,Yoon等^[67]提出了一种基于商业无人机的结构位移测量方法,根据结构的背景特征信息估计相机的六自由度运动,并将其从相对位移中减去,从而得到被测结构的绝对位移。将所提方法应用于铁路桥模拟试验,测量其在列车荷载作用下的动位移。结果表明,该方法能够准确测量桥梁结构的位移, RMSE 误差为 2.14 mm。

2018年,Moreu等^[68]将激光多普勒测振仪与无人机集成为一个系统,使用截止频率为 0.5 Hz 的高通滤波器去除无人机自身运动,从而测量铁路桥梁的平面外位移。与传统传感器相比,所提方法测量的平均峰值位移误差约为 1.5 mm,均方根误差为 8%,能够满足工程测量精度要求。

2019年,Hoskere等^[69]提出了一种新型的基于视觉的无人机视频位移测量方法。该方法假设无人机在悬停时的振动频率在 0.5 Hz 以下,从而使用高通滤波器消除无人机悬停时的基点运动影响。将所提方法应用于六层框架振动台试验测量的结构固有频率误差小于 0.5%;应用于人行吊桥试验测得的桥梁固有频率误差小于 1.6%。

2020年,Khuc等^[70]提出了一种基于无人机的无标靶结构位移测量方法。该方法通过跟踪背景中的固定参考点来消除无人机的自身运动,从场景中已知尺寸的物体获取比例因子的变化。经小型钢塔试验验证,所提方法可以用于估计结构的高精度位移。

2021年,Chen等^[71]提出了一种基于 DIC-UAV 的桥梁模态特性提取方法。该方法利用参考点建立单应性矩阵,基于单应性变换剔除无人机基点运动,从而计算目标的绝对位移。经试验测试,采用该方法测得的桁架桥模型的固有频率和振型误差不到 1%。

2021年,Perry等^[72]将光学相机和红外相机相结合,使用无人机电载双相机测量结构的三自由度平动响应。其中光学相机测量结构的平面内位移,红外相机测量结构的深度方向位移,并使用固定的地面参考点消除了无人机自身运动。经振动台试验证明,该方法测得的结构固有频率误差小于 3.5%。

2021年,Ribeiro等^[73]根据嵌入式惯性测量单元(IMU)的数据解算无人机的

自身运动，将其从基于目标跟踪获取的相对位移中减去，从而测量结构的绝对位移。在实验室动目标测试下，该方法获取的位移结果与传统传感器相比峰值误差为 0.096 mm；在现场静态目标测试下，该方法基于视频估计的目标的虚拟位移和 IMU 位移之间误差为 1.47 mm。

2022 年，Han 等^[74]通过投射静止的激光光斑作为固定参考目标，不断更新图像尺度因子，从而消除无人机平行和垂直结构平面的运动。通过实验室两层框架和现场悬索桥测试验证了该方法的有效性。结果表明，利用无人机测量的位移数据与激光位移计和固定相机测量的参考数据高度吻合。

2023 年，Jiang 等^[75]提出了一种基于双摄像机的无人机桥梁位移测量方法。分别采用长焦镜头和广角镜头采集桥上目标点和背景固定参考点的运动视频，然后利用两摄像机之间的单应关系消除无人机的位移。通过实验室试验和现场桥梁测试验证了该方法的有效性和实用性。

2023 年，Nasimi 等^[76]将非接触式激光传感器与无人机结合，并增设地面参考目标，从激光传感器捕获的桥梁面外位移中消除无人机自身的基点运动。经桁架桥现场试验证明，所提的激光-无人机测量系统测得的结构面外位移均方根误差在 14 %-34 %之间。

综上，现有的基于无人机的桥梁位移测量研究在剔除无人机自身振动问题上采用的方法主要分为三大类：

(1) 无人机嵌入惯性测量单元 (IMU) 剔除法。由于 IMU 主要应用于无人机大尺度导航定位，精度无法达到毫米级，且飞控内循环频率低，解算困难，故该方法在桥梁位移精确测量领域的应用受限。

(2) 高通滤波剔除法。该方法假设无人机自身振动频率在 0.5 Hz 以下而结构的运动是高频的，故不适应于目标振动频率与无人机振动频率相近的情况，且易受风等环境影响，误差较大。

(3) 背景不动点剔除法。该方法是应用最广泛的方法，但目前的研究仍暴露一些缺陷。首先，大部分的研究停留在无人机平面内运动的剔除，对于无人机靠近或远离结构引起的位移换算尺度因子的变化研究较少，精度有待进一步提升。其次，对于该方法的应用大部分停留在实验室小模型阶段。主要因为在实际桥梁工程中，为了保证视野中同时出现被测结构和背景不动点，无人机有时需要悬停在距离被测平面较远的地方，从而导致测量精度下降，无法满足工程测量要求。最后，大部分的研究均没有考虑空间几何误差，该参数在测点距离背景不动点较远或者无人机测距过近时对位移测量影响显著。

1.2.4 基于机器视觉技术的桥梁影响线测量研究现状

影响线反映了桥梁的刚度或柔度信息，是评估桥梁运营期间结构安全性能的

重要指标。《桥梁承载能力快速测试与评估技术规程》^[77]对利用加载车进行桥梁影响线快速测试与识别从而评估桥梁承载能力的流程进行了规范。影响线的准确测量可以用于车辆超载识别，可通过结构响应直接反演车辆轴荷载^[21,78,79]。基于影响线变化进行桥梁性能状态评估近年来成为桥梁结构健康监测领域的研究热点^[80~83]。然而传统的桥梁影响线实测方法依附车辆称重系统和各类传感器的应用^[84~86]，使得影响线的实测过程繁琐、费时且成本昂贵，针对中小型桥梁的新型影响线实测方法亟待开发。

随着机器视觉技术的兴起与发展，车辆的类型、轴距、轴重等信息均能从监控视频流中获取^[8,54,87,88]，影响线识别手段变得更加经济、灵活和智能。Zaurin 和 Catbas 等^[89~91]提出了一种视觉成像和布设传统传感器进行数据综合的桥梁结构健康监测框架体系，通过视频流对车辆模型进行分类、检测和跟踪，利用传感器同步采集响应计算结构影响线，经现场试验验证了所提方法的有效性。Dong 等^[92]将基于机器视觉的结构输入（车辆位置信息）与非接触式传感器的结构输出（结构位移响应）相结合，提出了一种完全非接触式的结构识别系统，实现了运营交通下的桥梁单元影响线测量。周云等^[93]提出了一种新型非接触式桥梁影响线识别方法，该方法融合车辆统计大数据、区间反演分析、支持向量机等多项技术手段，在数值模拟和实验室试验中获得了较好的识别结果。Jian^[94]等提出了一种基于影响线理论和机器视觉技术相结合的交通信息识别方法，有效识别了中小跨度桥上车辆的轴重、速度、车辆类型、车轴数和时空分布，具有较高的稳定性和高效性。Tian 等^[95]提出了一种基于视觉测量和移动冲击测试的大型结构快速识别方法，经数据集成识别出整个结构的振型，并通过实验室悬臂梁试验验证了该方法的有效性。Dan 等^[96]定义了稳态交通流作用下的扩展影响线系数，提出了一套从监测大数据中识别该影响线系数的方法，适用于复杂多变的监测环境且具有良好鲁棒性。

综上所述，现有的基于机器视觉技术的结构影响线实测方法相比传统方法更加轻量化和高效化，但仍具有局限性：

(1) 影响线实测方法仍然部分依赖 WIM 系统等传统接触式传感器安装，对于量大面广的中小型桥梁全面安装成本仍然较高。

(2) 影响线计算依赖于轴重、轴距、车速等参数的准确输入，随着输入参数与实际参数的偏差增大，影响线计算误差也会增大，导致影响线识别具有不确定。

(3) 对正在运营中的桥梁进行车辆的称重和传感器安装需要暂时封闭车流，阻碍交通正常运营，对于城市要道桥梁、高速公路桥梁等不易封闭交通的桥梁更加具有实施难度。

因此，在实际工程背景下，研究一种不依赖 WIM 系统和传统接触式传感器的桥梁影响线识别方法具有重要意义。

1.3 本文研究内容

1.3.1 选题依据

本文选题基于国家自然科学基金项目“基于非接触式机器视觉监测技术与区间仿射算法的桥梁结构影响面反演”(如图 1.8)。本文基于该项目研究三和研究四的内容展开,首先以无人机为载体,研究了基于无人机摄影测量的桥梁结构动位移测量方法,然后将机器视觉技术与区间仿射算法相结合,提出了一种新型的、智能化的桥梁结构位移影响线测量方法。本文的研究以基于机器视觉技术的结构非接触式位移测量和结构识别理论为基础,以为构建多层次、多尺度、多维度的桥梁结构健康监测方法提供借鉴意义。

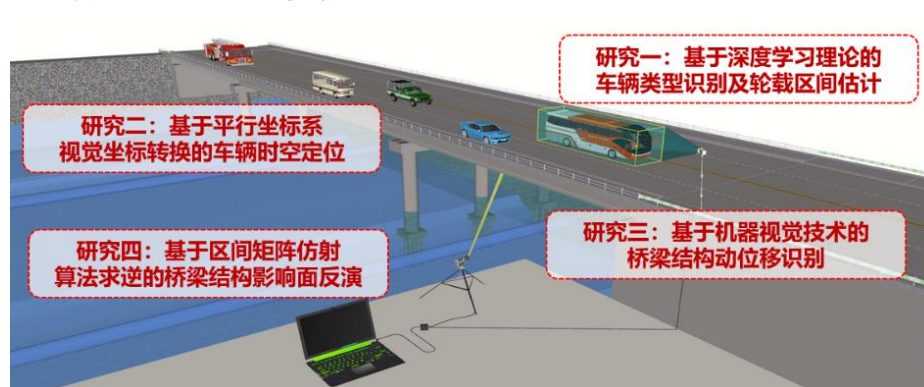


图 1.8 国家自然科学基金研究内容

1.3.2 主要研究内容

本文从桥梁检测的实际需求出发,以实现低成本、智能化、轻量化的中小型桥梁检测为目标,围绕桥梁变形检测和结构识别,开展了基于无人机和机器视觉技术的结构动态位移和位移影响线测量方法研究。主要研究内容如下:

第一章为绪论。首先阐述了位移监测在结构状态评估中的重要性以及传统的位移测量方法存在的缺陷,强调了基于机器视觉技术的结构位移测量的优越性;然后介绍了 5 种常用的主流位移追踪算法及其研究现状;接着分析了基于机器视觉和无人机的桥梁结构位移测量研究现状以及基于机器视觉技术的桥梁影响线测量研究现状;最后阐述了本文的主要研究内容。

第二章详细阐述了本文第三、四章研究采用的位移算法的理论基础。首先介绍了基于机器视觉技术的结构位移测量系统;然后重点介绍了采用的数字图像相关算法的基本原理,具体包括形函数的选择、相关函数的选择以及所采用的整像素和亚像素算法;最后简要介绍了几种常用的相机标定方法。

第三章提出了一种基于单目无人机的结构动态位移测量方法。首先介绍了无人机在悬停时的位移漂移规律;然后提出了基于背景不动点补偿无人机平面内位移漂移、基于 ArUco 编码标靶提取自适应尺度因子补偿无人机平面外的位移漂移、

基于对称背景不动点修正空间几何误差的无人机位移补偿理论；最后通过实验室钢框架模型试验验证了所提方法的测量精度并测试了测距对精度的影响。

第四章提出了一种基于无人机载双相机的桥梁动态位移测量方法。介绍了无人机搭载同轴双相机的测量系统组成及其测量优势；基于双相机标定结果，推导了该系统剔除无人机基点运动从而测量结构绝对位移的理论公式；最后通过室外钢框架模型试验和野外实际桥梁试验验证了所提方法的测量精度。

第五章提出了一种融合机器视觉与区间仿射算法的桥梁结构位移影响线实测方法。首先基于机器视觉技术采用固定相机获取多工况的桥梁测点动态位移响应；其次，根据车辆出厂信息建立车辆轴重区间矩阵并通过区间仿射算法计算多工况的影响线区间；最后，采用支持向量机（SVM）从影响线区间中识别桥梁真实影响线。在野外实桥试验中，通过控制标定车辆的载重和行驶速度获取多工况的位移响应数据并进行分析，评估了该方法的有效性和稳定性。

结论与展望部分对全文的研究内容进行了总结，同时归纳了研究存在的不足，并对接下来的研究内容进行了展望。

第2章 数字图像相关法位移测量理论基础

2.1 引言

数字图像相关(DIC)法是一种经典的非接触式光学测量方法,它通过对连续两幅图像的灰度特征进行对比分析,从而获取被测结构表面的位移和应变等信息。与传统的接触式测量相比,该方法具有非接触、操作简单、能够长距离多点实时监测等优势,在结构动态位移测量中被证明具有较好的测量效果。按照测量需求的不同,数字图像相关法通常可以分为二维和三维两部分,本章主要介绍了二维DIC法位移测量的理论基础,具体包括测量系统组成、形函数的选择、相关函数的选择、整像素和亚像素搜索算法以及几种常用的相机标定方法等,为后续的基于无人机的结构位移测量研究做好前置工作。

2.2 数字图像相关法测量系统组成

图2.1为基于DIC法的结构位移测量系统的基本组成,具体包括相机和镜头、计算机及处理软件、光源和标志物等。根据实际工程的测量条件不同,系统的组成具有一定差异。



图 2.1 基于 DIC 法的结构位移测量系统

相机是图像采集的关键设备,在土木工程领域主要采用数码相机进行结构位移测量。按照传感器类型的差异,数码相机可以分为 CCD(Charge-Coupled Device)相机和 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)相机。其中,CCD是一种电荷耦合器件,它将光学信号转换为数字信号,其上植入的微小感光物质称为像素,像素数越多,画面分辨率越高;CMOS是一种互补金属氧化物半导体,为电压控制的放大器件,是一种低成本的感光元件。两者性能对比如表 2.1 所示,由表可知,CMOS 相机相比 CCD 相机而言,价格不高、采样频率较高、输出速度

较快、功耗低且集成性较好，故在结构位移测量领域被广泛应用。常用的基于机器视觉的结构位移测量数码相机类型如图 2.2 所示。

表 2.1 CCD 相机与 CMOS 相机性能对比

相机类型	光敏性	读取速度	整合能力	功耗	响应均一性	成本
CCD 相机	强	慢	差	高	良好	高
CMOS 相机	弱	快	强	低	较差	低



图 2.2 机器视觉结构位移测量数码相机类型

镜头是实现光电信号转化的设备，通常由多个玻璃元件组成，决定着成像的视角、清晰度、色彩等质量。目前市场上的镜头类型主要有定焦镜头、变焦镜头、广角镜头、长焦镜头、微距镜头、鱼镜头等。定焦镜头具有固定的焦距，通常拥有较大的光圈，能提供出色的景深和画质；变焦镜头具有可变焦距，能够在不更换镜头的情况下拍摄不同焦距的照片；广角镜头焦距较短，适用于拍摄大场景建筑物；长焦镜头具有较长的焦距，适用于拍摄远距离的景物；微距镜头专门用于拍摄微小物体，具有极高的放大比率和浅景深；鱼镜头具有极端广角，可以捕捉到 180° 场景，呈现球形畸变的效果。其中，在土木工程领域主要应用定焦镜头和变焦镜头进行视频位移监测，两者能够提供相对稳定的拍摄视野。在选取镜头时，应充分考虑相机传感器大小、分辨率、测距等条件，且要尽量选择畸变较小的镜头，降低畸变导致的测量误差。

标志物是位移测量精度的关键，主要分为人工标志物和自然标志物两类。目前结构位移测量领域常用人工标志物主要有平板带图案（如棋盘格、二维码和 ArUco 编码等）、人工光源、人工散斑和激光光点等；常用的自然标志物主要是结构表面的纹理图像特征（如裂缝和螺栓等）。标志物可以给被测结构提供更高的背景区分度，从而优化标定和跟踪效果，以达到更精确的测量效果。在实际工程中应灵活选择标志物，如果结构本身纹理特征不明显，需额外安装人工标志物；如果工程本身不易安装人工标志，需使用自然标志物。

为确保图像相关法位移测量的精度,在布施测量系统时应注意以下几点细节:一是确保相机在采集视频图像时保持稳定,避免相机的相对位移对测量结果造成影响;二是尽量使相机的光轴与被测结构平面保持垂直,减小位移转换过程带来的误差;三是保证被测结构与周围环境有较高的对比度,必要时添加人工标志;四是确保合适的光照条件,必要时添加补充光源或进行强光遮挡。

2.3 数字图像相关法基本原理

基于 DIC 法的结构位移测量的基本原理如图 2.3 所示。在变形前的参考图像上选取 $(2M+1) \times (2M+1)$ 像素的参考子区 T , 其中心点为 A 。根据灰度特征经相关性计算,在变形后的图像上匹配与参考子区 T 相关性最大的目标子区 T' , 其中心点为 A' 。则 A 、 A' 点的坐标差 (u_0, v_0) 即为参考子区的位移。参考子区内距离 A 点 $(\Delta x, \Delta y)$ 的任意点 P 的位移为 $(u(\Delta x, \Delta y), v(\Delta x, \Delta y))$, 其中 u 、 v 函数分别代表了参考子区在二维平面方向上的变形信息。

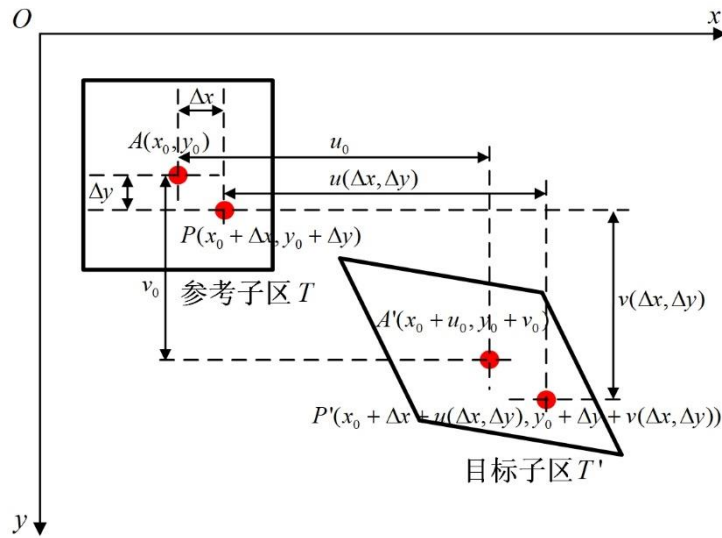


图 2.3 DIC 法位移测量基本原理

2.3.1 子区形函数的选择

由图 2.3 可知,结构变形通常是子区位置和形状的同时改变。通常用零阶、一阶和二阶形函数描述子区变形,三者的表达式如下^[97]:

$$W_0(\Delta x, \Delta y; p_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & u \\ 0 & 1 & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$W_1(\Delta x, \Delta y; p_1) = \begin{bmatrix} u_x + 1 & u_y & u \\ v_x & v_y + 1 & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$W_2(\Delta x, \Delta y; p_2) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}u_{xx} & u_{xy} & \frac{1}{2}u_{yy} & u_x + 1 & u_y & u \\ \frac{1}{2}v_{xx} & v_{xy} & \frac{1}{2}v_{yy} & v_x & v_y + 1 & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x^2 \\ \Delta x \Delta y \\ \Delta y^2 \\ \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

式中， W_0 、 W_1 、 W_2 分别代表零阶、一阶、二阶形函数； $(\Delta x, \Delta y)$ 表示以参考子区中心为原点的局部坐标； $p_0 = (u, v)^T$ ； $p_1 = (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y)^T$ ； $p_2 = (u, u_x, u_y, u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v, v_x, v_y, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy})^T$ ； u 、 v 代表参考子区在 x 、 y 方向上的位移； u_x 、 u_y 、 v_x 、 v_y 代表相应方向位移的一阶导数； u_{xx} 、 u_{xy} 、 u_{yy} 、 v_{xx} 、 v_{xy} 、 v_{yy} 代表相应方向位移的二阶导数。

零阶形函数仅可以描述结构的刚体平移运动，不适用于大变形位移测量，使用范围受限；二阶形函数能够描述平移、拉压、剪切、弯曲、扭转等多种变形形式，但表达式复杂，计算量大；而一阶形函数既可以满足土木工程结构位移测量通常产生的刚体位移、拉压、旋转和剪切等变形描述，表达式又相对简单，故本文采用一阶形函数描述子区变形。

2.3.2 相关函数的选择

数字图像相关法利用相关函数计算目标子区与参考子区之间的相关性，通过搜索相关系数的峰值位置作为匹配位置。相关函数主要分为互相关函数和误差平方和相关函数^[98]。各相关函数及其表达式见表 2.2。

表 2.2 常用的相关函数

名称	函数表达式
直接互相关 (CC)	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)]$
归一化互相关 (NCC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)}{fg} \right]$
零均值归一化互相关 (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}$
误差平方和 (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$

(续表)

名称	函数表达式
归一化误差平方和 (NSSD)	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2$
零均值归一化误差平方和 (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$

表中, $f(x_i, y_j)$ 和 $g(x'_i, y'_j)$ 分别表示变形前后子区图像灰度值; f_m 和 g_m 分别代表变形前后子区灰度平均值; f_m 、 g_m 、 \bar{f} 、 \bar{g} 、 Δf 、 Δg 表达式如下:

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j) \quad (2.4)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j) \quad (2.5)$$

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)]^2} \quad (2.6)$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j)]^2} \quad (2.7)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2} \quad (2.8)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2} \quad (2.9)$$

相关函数直接影响计算效率, 其选用应遵循以下准则:

(1) 普适性。优先选用易于进行数据处理、便于得到函数极值点、且具有较高的计算效率的相关函数。

(2) 抗噪性。在光照变化或者采集设备受到干扰的复杂环境下仍能准确得到匹配结果。

(3) 可靠性。选择的相关函数对子区变形具有较高灵敏度, 且不会出现多个极值导致无法匹配。

根据上述相关函数选用准则, 目前土木工程结构位移测量领域广泛采用的相关函数主要是 ZNCC 函数和 ZNSSD 函数两种。两者在经过去均值和归一化处理

后，在抗干扰能力方面均优于其他相关函数，对光照变化敏感性低，从而降低了光线变化对图像灰度变化带来的影响。虽然两者的函数表达式不同，但从数学的角度来说两者是等价的，可以互相转换： $C_{ZNCC} = 1 - 0.5 \times C_{ZNSSD}$ [99]。考虑到 ZNCC 函数的取值为[-1,1]，而 ZNSSD 函数的取值范围为[0,4]，ZNCC 函数在表达上更为直观，故本文选择 ZNCC 函数作为相关函数。

2.3.3 整像素位移搜索算法

在数字图像中，图像被分割成一个个小方块，每个方块称为一个像素，它是图像中最小的可控制元素，也是图像处理中的基本单位。亚像素是指在数字图像中对单个像素进行更精细的分解或采样，以获取比单个像素更高分辨率的图像信息。在数字图像相关法中，整像素位移搜索是基于相关函数计算得到的。在变形图片中保持跟参考子集尺寸一样的窗口，按照一定的路径依次计算当前子集与参考子集的相关性，相关系数最大的子集位置即为目标变形子集。由于子集搜索的步长为整像素，故得到的位移为整像素位移。整像素位移通常是后续亚像素位移搜索的初值，因此准确、迅速地整像素配准是至关重要的。

数字图像的分辨率通常在百万级以上，为了在海量像素点中快速准确地配准整像素位移，通常人为设置感兴趣区域（ROI），将全局搜索变为区域搜索，缩短无效匹配时间。在 ROI 区域内的整像素搜索算法主要有逐点搜索法、十字搜索法、粗-精细搜索法和三步搜索法等 [100]。

（1）逐点搜索法是最直接的搜索方式，在变形图像上逐行或逐列进行相关函数计算，所有像素点计算完毕后，选取相关系数峰值位置作为目标子集的位置。逐点搜索法对所有像素点进行无差别计算，在 ROI 区域划分正确的前提下，几乎不存在误匹配。但是该方法计算量较大，计算耗时，限制了其应用范围。

（2）十字搜索法的核心思想是随机选一个初始点为中心，沿水平和竖直两个方向（十字形）交替搜索，根据相关系数值确定下一步的搜索方向。当找到相关系数峰值点时，算法将停止搜索，并将该点视为匹配的目标点。由于优化了搜索路径，该方法效率明显提升，但抗噪性较弱，容易出现峰值不明显或者多峰和假峰现象，误差较大。

（3）粗-精细搜索法在逐点搜索法的基础上进行改进，该方法首先在 ROI 区域内随机选择一点作为粗搜索点，然后以一个较大的步长逐点进行相关性计算，匹配出目标点的大致方向，接着以粗匹配点为细搜索点，以一个较小的步长向四周扩散搜索，最后直到用该方法循环匹配出步长为一个像素的最优匹配点。该方法通过增大搜索间隔减少了运算量，计算效率有所提高，但步长设置较为复杂。

（4）三步搜索法在粗-精细搜索算法的基础上优化了步长设置问题，采用步长减半的方式控制步长。比如搜索半径为 9 pixel，那么，第一步步长可设置为 4

pixel，第二步步长减半为 2 pixel，第三步再减半为 1 pixel。通过这种步长有序减半的方式，有效提高了整像素搜索效率。

为兼顾整像素搜索算法的精度和效率，本文在逐点搜索的基础上引入图像灰度积分图，预先构建参考子区变形前后的图像灰度矩阵 (f 和 g) 和灰度平方 (f^2 和 g^2) 积分图，减小了 ZNCC 函数的运算量，从而提高计算效率^[101]。

2.3.4 亚像素位移搜索算法

在土木工程结构位移测量中，整像素位移可能无法达到测量精度要求，需要进一步从算法上优化，达到亚像素级图像配准。在数字图像相关法中，常用的亚像素位移搜索算法主要有曲面拟合法^[102]、灰度插值法^[103]、灰度梯度法^[104]和迭代法^[105]等。

(1) 曲面拟合法：该方法以整像素搜索得到的整像素坐标为初始点，将其周围一组离散点数据拟合成平滑的曲面，通过寻找拟合函数的极值确定亚像素坐标。该方法抗噪性强、精度高、计算效率高，在亚像素位移配准方面被广泛应用。

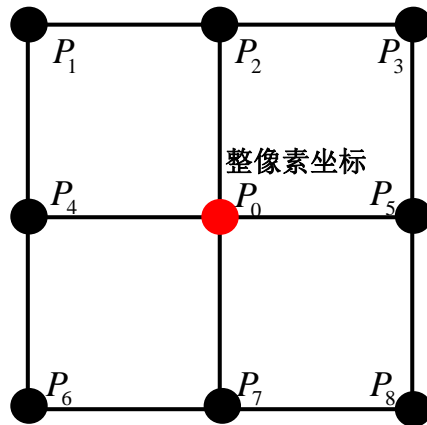


图 2.4 二元二次多项式曲面拟合示意图

拟合函数是决定曲面拟合算法精度与效率的关键。常用的拟合函数有对数曲面拟合、二元二次多项式曲面拟合和最小二乘曲面拟合等。以二元二次多项式曲面拟合为例 (图 2.4)，设整像素匹配点坐标为 $P_0(x_0 + u, y_0 + v)$ ，其中 (u, v) 代表图像二维方向上的整像素位移。取 P_0 周围相邻的 8 个整像素点，编号为 $P_i (i=1, 2, \dots, 8)$ 。则 P_0, P_1, \dots, P_8 点的相关系数 C_0, C_1, \dots, C_8 可以由二元二次多项式表示：

$$C(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (2.10)$$

代入 P_0, P_1, \dots, P_8 点的坐标及通过 ZNCC 函数求得的各点相关系数值 C_0, C_1, \dots, C_8 ，则可以用最小二乘法求得 a_0, a_1, \dots, a_5 。下面将可以由公式(2.11)和(2.12)求取曲面拟合极值点 P_0' 。

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial x} = a_1 + 2a_3x + a_4y = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial y} = a_2 + 2a_5y + a_4x = 0 \quad (2.12)$$

求得 P_0' 的坐标为 $(\frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}, \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5})$ ，将该坐标与参考子区原始坐标 (x_0, y_0) 相减即可得到子区的亚像素位移。

(2) 灰度插值法：该方法的基本原理通过插值将图像从离散的灰度值转换为连续灰度场，然后再通过相关函数计算搜索亚像素位移。该方法的计算精度和效率主要取决于插值函数的选择。目前常用的灰度插值法主要有最邻近插值法、双线性插值法和双三次立方插值法等。以双三次立方插值法为例，下面主要介绍其亚像素位移配准原理。

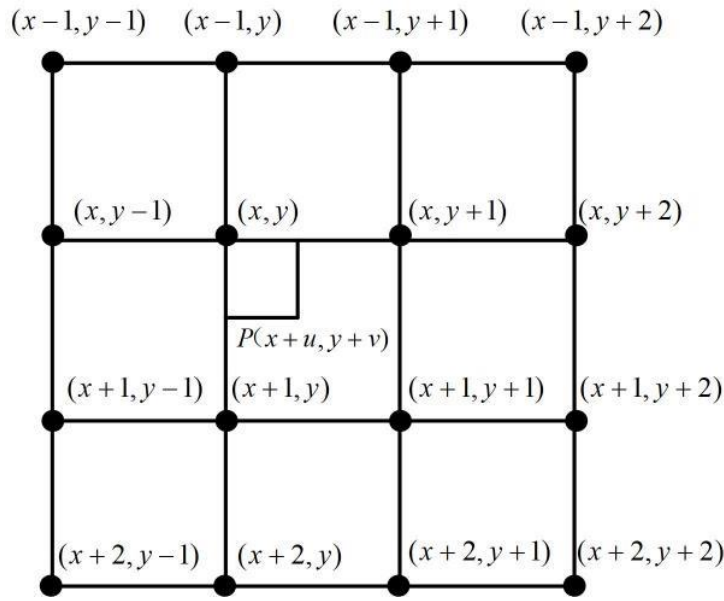


图 2.5 双三次立方插值法示意图

如图 2.5，设待匹配的亚像素坐标点为 $P(x+u, y+v)$ ，其灰度值为 $f(x+u, y+v)$ 。对相关计算得到的整像素坐标 (x, y) 周围 16 个整像素点的灰度值进行加权计算，则 P 点的灰度值可通过下式计算：

$$f(x+u, y+v) = [A] * [B] * [C] \quad (2.13)$$

$$[A] = [S(u+1), S(u), S(u-1), S(u-2)] \quad (2.14)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} f(x-1, y-1) & f(x-1, y) & f(x-1, y+1) & f(x-1, y+2) \\ f(x, y-1) & f(x, y) & f(x, y+1) & f(x, y+2) \\ f(x+1, y-1) & f(x+1, y) & f(x+1, y+1) & f(x+1, y+2) \\ f(x+2, y-1) & f(x+2, y) & f(x+2, y+1) & f(x+2, y+2) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$[C] = [S(v+1), S(v), S(v-1), S(v-2)]' \quad (2.16)$$

$$S(x) = \begin{cases} 1 - 2|x|^2 + |x|^3, & 0 \leq |x| < 1 \\ 4 - 8|x| + 5|x|^2 - |x|^3, & 1 \leq |x| < 2 \\ 0, & |x| \geq 2 \end{cases} \quad (2.17)$$

式中， $S(\bullet)$ 为插值核函数。

由于灰度插值法得到的连续灰度场是计算机模拟出来的，与实际灰度会产生一定误差，且该方法计算量较大，耗时严重，故灰度插值法一般不单独用于亚像素位移配准。

(3) 灰度梯度法：该方法基于图像灰度分布搜索亚像素位移。该算法在使用时基于两个基本假定^[104]：

1) 图像灰度不变假定：假设被测结构在发生位移变形时，变形前后图像中同一点的灰度值不发生改变。

2) 刚体运动假定：假设被测结构产生微小运动时，参考子区内各点的运动方向和位移相同，近似刚体运动。

假设结构位移前后图像的灰度值分别为 $f(x, y)$ 和 $g(x', y')$ ，由基本假定可推出：

$$f(x, y) = g(x', y') = g(x + x_0 + \Delta x, y + y_0 + \Delta y) \quad (2.18)$$

式中， x_0 和 y_0 分别表示整像素位移； Δx 和 Δy 分别表示亚像素位移。

将式(2.18)对 Δx 和 Δy 进行一阶泰勒展开并省略高阶分量得到：

$$g(x + x_0 + \Delta x, y + y_0 + \Delta y) = g(x + x_0, y + y_0) + g_x \Delta x + g_y \Delta y \quad (2.19)$$

式中， g_x 和 g_y 分别表示图像二维方向上的灰度梯度。

通常采用 Horn、Barron 和自然样条等算子求解^[106]。以 Barron 算子为例，其表达式为：

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} = \frac{g(x-2, y)}{12} - \frac{8g(x-1, y)}{12} + \frac{8g(x+1, y)}{12} - \frac{g(x+2, y)}{12} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial y} = \frac{g(x, y-2)}{12} - \frac{8g(x, y-1)}{12} + \frac{8g(x, y+1)}{12} - \frac{g(x, y+2)}{12} \quad (2.21)$$

设目标函数为：

$$\frac{\partial C(\Delta x, \Delta y)}{\partial \Delta x} = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial C(\Delta x, \Delta y)}{\partial \Delta y} = 0 \quad (2.23)$$

由式 (2.20) ~ (2.23) 计算得到参考子区的亚像素位移 Δx 和 Δy 为：

$$[\Delta x, \Delta y] = A^{-1}B \quad (2.24)$$

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_x^2 & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_x g_y \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_x g_y & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_y^2 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x, y) - g_x(x + x_0, y + y_0)] \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x, y) - g_y(x + x_0, y + y_0)] \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

灰度梯度法数学理论完善,算法易于实现,但其在泰勒展开时忽略了高阶量,产生的误差会随 Δx 和 Δy 的增大而增大。虽然使用高阶泰勒展开可以减小误差,但同时也会加大计算量,增大计算耗时,限制了该方法的广泛应用。

(4) 迭代法: 牛顿拉弗森算法 (FA-NR) 和反向组合的高斯牛顿算法 (IC-GN) 是数字图像相关领域广泛应用的亚像素迭代法。其中 IC-GN 法是在 FA-NR 法基础上优化而来,它省去了每次迭代中 Hessian 矩阵的计算,提高了算法的计算效率,故本文采用 IC-GN 算法进行亚像素位移计算。

IC-GN 算法的精度和效率很大程度上取决于迭代初值的准确性。传统的 IC-GN 算法以整像素坐标为初值,不够精确,可能会造成迭代次数的增加或者迭代不收敛,故本文基于课题组成员程依婷的研究^[107],采用改进初值的 IC-GN 算法进行亚像素位移测量。

该方法在使用 ZNCC 相关函数获取参考子区的整像素坐标后,通过嵌套粗-精细搜索算法计算亚像素初始坐标作为后续 IC-GN 算法的迭代初值。具体做法是:以整像素坐标为原点,以 0.25 pixel 为步长,在其周围相邻 3×3 pixel 大小的子集内进行相关搜索,从而匹配亚像素坐标。

设上述方法匹配的亚像素位移初值为 u 、 v ,分别用式(2.27)和(2.28)描述参考子区位置形状变化的形函数和位置形状增量扭曲函数:

$$W(\xi, p) = \begin{pmatrix} 1+u_x & u_y & u \\ v_x & 1+v_y & v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

$$W(\xi, \Delta p) = \begin{pmatrix} 1+\Delta u_x & \Delta u_y & \Delta u \\ \Delta v_x & 1+\Delta v_y & \Delta v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

式中, p 为变形向量, $p=(u, u_x, u_y, v, v_x, v_y)^T$; Δp 为变形增量, $\Delta p=(\Delta u, \Delta u_x, \Delta u_y, \Delta v, \Delta v_x, \Delta v_y)^T$ 。则基于扭曲变形的 ZNSSD 函数表达式如下:

$$C_{ZNSSD}(\Delta p) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{f[(\psi + W(\xi, \Delta p))] - f_m}{\Delta f} - \frac{g[(\psi + W(\xi, p))] - g_m}{\Delta g} \right\}^2 \quad (2.29)$$

式中, $\psi=(x,y,1)^T$ 代表子区全局坐标; $\xi=(\Delta x,\Delta y,1)^T$ 代表子区局部坐标。将式(2.29)一阶泰勒展开, 经最小二乘法求得其最小值:

$$\Delta p = H^{-1} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ [\nabla f(\psi + \xi) \frac{\partial W}{\partial p}]^T \left[\frac{\Delta f}{\Delta g} g[(\psi + W(\xi, p))] - \frac{\Delta f}{\Delta g} g_m - [f(\psi + \xi) - f_m] \right] \right\} \quad (2.30)$$

式中, $\partial W / \partial p$ 是雅克比矩阵; H 为 Hessian 矩阵, 是常数矩阵, 其表达式为:

$$H = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ [\nabla f(\psi + \xi) \frac{\partial W}{\partial p}]^T [\nabla f(\psi + \xi) \frac{\partial W}{\partial p}] \right\} \quad (2.31)$$

将 Δp 代入式(2.32), 更新目标子区形变量, 重复上述迭代, 当 Δp 满足收敛条件时, 即可获取精确亚像素位移。

$$W(\xi, p) \leftarrow W(\xi, p) \circ W^{-1}(\xi, \Delta p) \quad (2.32)$$

该算法经计算机模拟仿真试验、实验室试验和野外试验验证, 具有较高的精度的稳定性, 在桥梁结构动态位移测量领域具有较好应用前景^[107]。

2.4 相机标定方法

基于上述数字图像相关理论得到的是图像坐标系下亚像素位移, 要想转化成现实世界的实际位移, 还需要对相机进行标定。常用的相机标定方法主要有一般相机标定法^[108]、单应性矩阵法^[109]和尺度因子法^[110]等。

2.4.1 一般相机标定法

相机标定需要获取相机的内外参数和畸变系数。图 2.6 为相机成像针孔模型, 图中世界坐标与图像坐标转换的表达式及其简化表达为:

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$s\mathbf{x} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]\mathbf{X} \quad (2.34)$$

式中, (x, y) 为图像坐标; (X, Y, Z) 为世界坐标; s 为尺度因子; f_x, f_y 分别代表镜头的二位方向焦距; c_x, c_y 分别代表相机主光轴的偏移量; γ 表示镜头倾斜系数; \mathbf{K} 为相机内参数矩阵; \mathbf{R} 为相机旋转外参矩阵; \mathbf{t} 为相机平移外参矩阵。

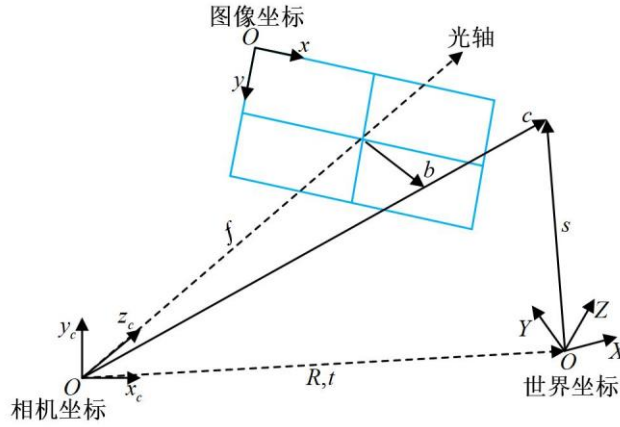


图 2.6 相机成像针孔模型

机器视觉中通常采用黑白棋盘对相机进行一般相机标定^[108]，该方法首先使用相机采集黑白棋盘不同角度的图片集，然后识别分析棋盘角点信息，从而计算相机的内外参数以及畸变系数。MATLAB 和 OpenCV 中均有实现相机快速一般标定的工具包可以调用。

2.4.2 单应性矩阵法

单应性矩阵法是一种简化的相机标定方法。当使用单个相机测量结构二维平面内的位移时，式(2.33)可以简写为：

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

式中， \mathbf{H} 表示单应性矩阵。

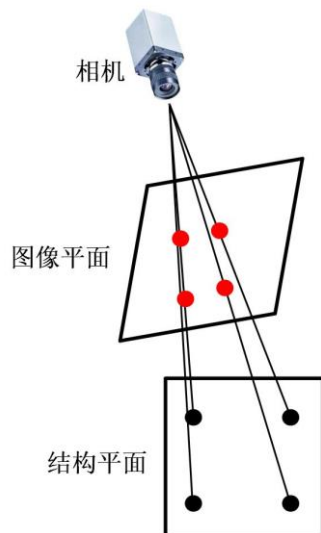


图 2.7 单应性矩阵法相机标定

求解单应性矩阵只需已知 4 组结构平面和图像平面的对应点（图 2.7）进行直接线性变换。采用单应性矩阵法进行相机标定可以消除光轴与待测平面夹角的影响，使标定结果更具有稳定性。

2.4.3 尺度因子法

尺度因子法是一种更简化的相机标定方法，该方法根据已知物理长度的物体在图像平面对应的像素长度估算位移转换的尺度因子。在桥梁结构位移测量中，往往测量任务仅是一维位移（例如桥梁的竖向位移测量），此时相机标定可进一步简化为图 2.8 所示。

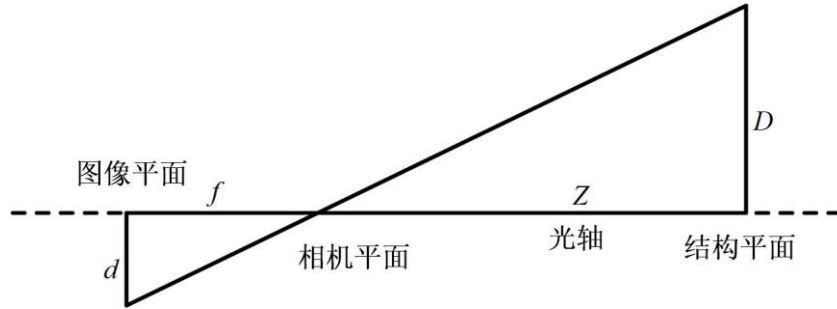


图 2.8 尺度因子法相机标定

当相机主光轴垂直于待测结构平面时，尺度因子 s 的表达式如下：

$$s = D / d \quad (2.36)$$

或者

$$s = \frac{Z}{f} d_{pixel} \quad (2.37)$$

式中， D 为已知物体的物理长度； d 表示该物体对应的像素长度； Z 为相机与待测平面之间的物距； f 为相机镜头的焦距； d_{pixel} 表示图像的像元尺寸。

当相机主光轴与待测结构平面的法线存在夹角 θ 时，可以通过下式进行修正：

$$s = \frac{Z}{f \cos^2 \theta} d_{pixel} \quad (2.38)$$

通常结构的物理尺寸可以通过结构图纸或者安装人工标志获取，像素尺寸可以利用计算机上直接在图像上量取。当相机焦距、像元尺寸和物距已知时，也可以用式(2.37)计算。尺度因子法是桥梁结构位移测量领域常用的相机标定方法，本文即采用该方法进行相机标定，获取像素位移向实际位移转换的尺度因子。

2.5 本章小结

本章主要介绍了基于数字图像相关的结构位移测量原理，为后续基于无人机的结构位移测量研究做好理论基础，主要结论如下：

(1) 首先介绍了基于机器视觉技术的结构位移测量系统组成，主要包括硬件（相机、镜头、计算机、光源、待测结构）和软件两部分。针对相机、镜头和标志物的选择进行了进一步介绍，并阐述了该测量系统在布施时的注意事项。

(2) 着重阐述了 DIC 算法的核心原理，其中涵盖了形函数的选取、相关函

数的确定，以及整像素和亚像素搜索算法等关键环节。确定了本文研究主要采用改进初值的反向组合高斯牛顿算法进行无人机位移计算。

(3) 最后介绍了几种常用的相机标定方法，包括一般相机标定法、单应性矩阵法和尺度因子法。对每种方法的原理和适用范围进行了阐述，最后确定了本文采用尺度因子法将像素位移转换为实际位移。

第3章 基于单目无人机的结构动态位移测量

3.1 引言

虽然机器视觉技术在土木工程结构健康监测领域飞速发展，但大多数研究都是基于固定相机进行结构监测，在实际桥梁应用中易受测距、拍摄角度和大气效应影响。随着无人机技术的发展，无人机凭借其灵活性和稳定性成为了基于视觉的结构位移测量的新载体，突破了固定相机拍摄距离的限制，更具有工程应用价值。但无人机悬停时由于自身振动或者环境影响会产生位移漂移，导致测得的位移数据中混杂了无人机与待测结构之间的相对位移。为了获取结构准确的绝对位移，研究无人机悬停时位移漂移的剔除方法具有重要意义。本章提出了一种基于单目无人机的结构动态位移测量方法。首先介绍了无人机悬停时的位移漂移规律；其次基于数字图像相关法和背景不动点理论补偿无人机平面内位移漂移；然后基于 ArUco 编码标靶逐帧更新自适应尺度因子补偿无人机平面外位移漂移；接着基于对称背景点进行空间几何误差修正；最后通过实验室钢框架模型试验验证了所提方法的有效性并测试了不同测距下所提方法的精度。

3.2 无人机悬停位移漂移规律

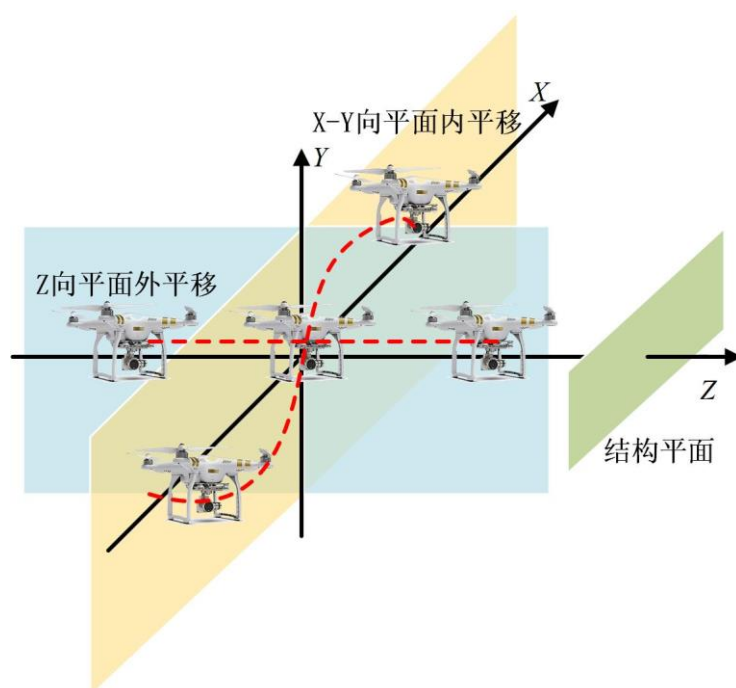


图 3.1 无人机悬停时的位移漂移规律

无人机悬停时通常会产生 6 个自由度的空间运动，即 3 自由度旋转运动和 3 自由度平移运动。随着无人机云台技术的进步，搭载镜头的云台在悬停时的角抖

动量可以控制在 0.01° 以内，因此可以忽略 3 个自由度的旋转运动带来的测量影响^[74,75]。为了更易区分，本文将无人机 3 个自由度的平移运动分为 X-Y 平面内平移和 Z 向平面外位移分别处理，如图 3.1 所示。

3.3 无人机平面内位移补偿

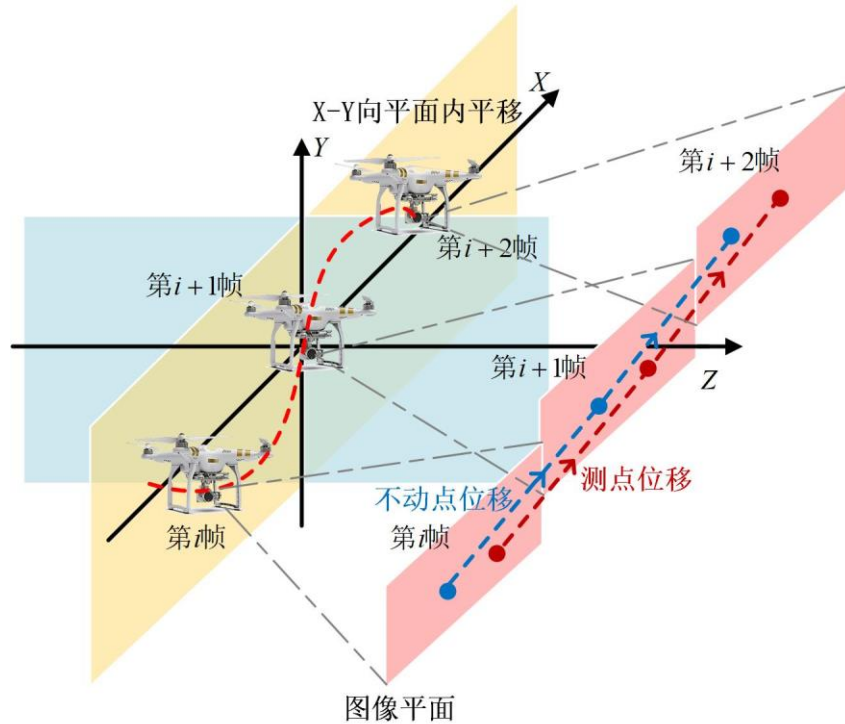


图 3.2 无人机平面内位移补偿原理

本文基于背景不动点理论补偿无人机平面内位移，如图 3.2 所示。假设无人机在平行于待测结构表面的 X-Y 平面内运动，采用数字图像相关法同时追踪待测结构和背景不动点。设第 i 帧下测得待测结构的像素位移为 x_i ，尺度因子为 k_i ；测得背景不动点的像素位移为 x_i' ，尺度因子为 k_i' ，则此时结构的绝对位移 d_i 表达式如下：

$$d_i = k_i x_i - k_i' x_i' \quad (3.1)$$

式中， x_i 和 x_i' 可以直接通过数字图像相关法计算得到，单位为 pixel； k_i 和 k_i' 在无人机仅在 X-Y 平面内运动时为定值，可以在任意帧通过已知物理尺寸的物体在图像上占有的像素长度计算得到，单位为 mm/pixel。

3.4 无人机平面外位移补偿

当无人机在平面外 Z 向运动时，随着无人机远离或靠近待测结构平面，采集的视频图像会发生一定比例的缩放，导致相同物理尺寸的物体在各帧图像上占有的像素长度不同，即式(3.1)中 k_i 和 k_i' 会逐帧变动而非定值，如图 3.3 所示。此时，

无人机绝对位移 d_i 的计算关键就在于 k_i 和 k_i' 的逐帧更新计算。

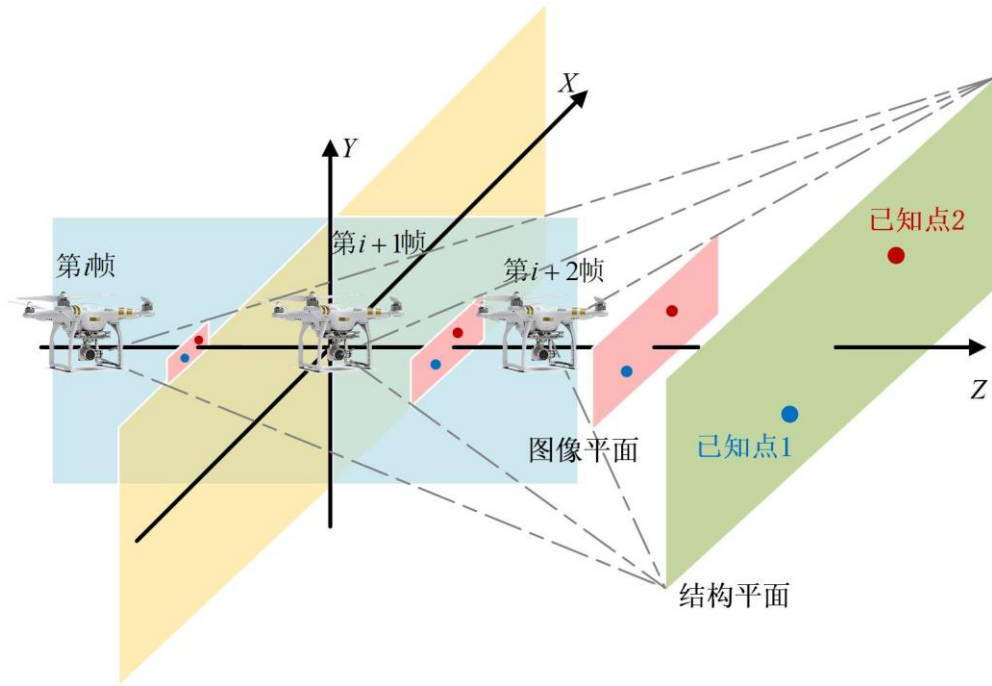


图 3.3 无人机平面外位移补偿原理

当待测结构与背景不动点不在同一平面时， k_i 和 k_i' 的值通常不相同。假设待测结构和背景不动点的已知物理尺寸的物体长度分别为 l 和 l' ，则第 i 帧的尺度因子 k_i 和 k_i' 可以由下式分别计算：

$$k_i = \frac{l}{p_i} \quad (3.2)$$

$$k_i' = \frac{l'}{p_i'} \quad (3.3)$$

式中， p_i 和 p_i' 分别表示第 i 帧下待测结构与背景不动点的已知物理尺寸的物体在图像上占有的像素长度。对于结构动位移测量而言，无人机采集的结构运动视频帧率通常在 30 Hz 以上，整个视频可能有几千帧，手动在每帧图片上测量像素长度的工作量是巨大的。因此，本文引入 ArUco 标靶^[111]，识别每帧 ArUco 标靶的角点坐标，从而自动计算标靶边长的像素长度，结合已知标靶边长的物理长度，即可计算每帧的尺度因子。

ArUco 编码常用于机器视觉和机器人领域，是一种由黑色边框和二进制矩阵组成的正方形标记。黑色边框辅助快速检测和定位角点坐标，内部二进制矩阵编制其 ID。根据具体使用场景的不同，ArUco 编码可以分为 4×4 、 5×5 、 6×6 和 7×7 等规格。图 3.4 a) 是一张 6×6 的 ArUco 编码，其内部 6×6 方块的排列组合方式决定了其 ID。本文基于 Python 实现 ArUco 编码的检测，首先将视频进行分帧，然后在每一帧图像中经自适应阈值分割、正射变换、轮廓筛选等图像处理手段后定位其角点精细化位置并确定其 ID，检测效果如图 3.4 b) 所示。

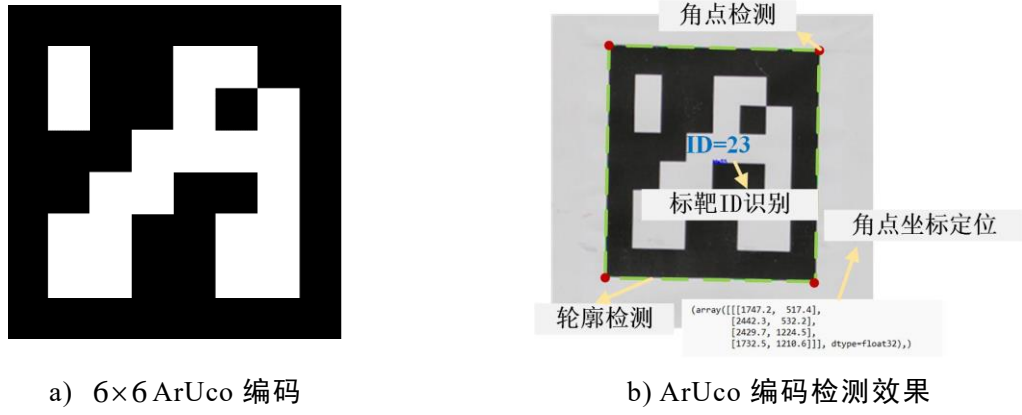


图 3.4 ArUco 编码及其检测效果

经 ArUco 编码标靶角点检测，得到四个角点的像素坐标后，即可求得编码边长的像素长度，由于标靶的实际物理边长已知，便可以根据式(3.2)和(3.3)求解 k_i 和 k_i' 。

实际桥梁工程中，在被测结构表面安装 ArUco 标靶往往不难实现，但对于跨江跨海桥梁而言，背景不动点通常会选在桥墩、桥塔或者远处建筑上，安装 ArUco 标靶并能成功识别是非常困难的。因此，本文提出了一种背景不动点尺度因子的转换方法。该方法首先通过待测结构表面的尺度因子结合镜头参数计算无人机在 Z 方向上运动的位移，然后根据无人机与背景不动点的初始距离，解算背景不动点的尺度因子。该方法的具体理论推导如下：

对于待测结构平面，根据尺度因子的计算公式(2.36)和(2.37)，可以得到：

$$k_i = \frac{l}{p_i} = \frac{Z_i}{f} d_{pixel} \quad (3.4)$$

式中， k_i 可以根据识别待测结构平面的 ArUco 标靶计算得到； f 和 d_{pixel} 是已知的无人机镜头焦距和像元尺寸，则无人机镜头距离待测结构表面的距离 Z_i 可以逐帧求解。设 Z_1 为无人机镜头距离待测结构表面的初始距离，则无人机在 Z 方向上运动的位移 m_i 可以由下式计算：

$$m_i = Z_i - Z_1 \quad (3.5)$$

同理，对于背景不动点平面，设无人机镜头相对于背景不动点的初始距离为 Z_1' ，其计算公式如下：

$$Z_1' = k_1' f d_{pixel} \quad (3.6)$$

式中， k_1' 可以根据已知物理尺寸的物体（例如桥墩和桥塔的结构尺寸等）在第一帧图像上占有的像素尺寸计算得到。下面可以推导第 i 帧无人机相对于背景不动点的距离 Z_i' 为：

$$Z_i' = Z_1' + m_i \quad (3.7)$$

则根据式(3.4)，背景不动点逐帧更新的尺度因子 k_i' 可以由下式计算：

$$k_i' = \frac{Z_i'}{f} d_{pixel} = \frac{Z_i' + m_i}{f} d_{pixel} \quad (3.8)$$

至此，待测结构和背景不动点的逐帧更新的尺度因子 k_i 和 k_i' 即可全部求解，则可以代入公式(3.1)计算结构绝对位移。

3.5 空间几何误差修正

上述无人机位移漂移剔除方法的推导基于相机小孔成像理论，适用于镜头、待测点和背景不动点三者的夹角 θ 足够小的情况，如图 3.5 a) 所示。若三者的夹角 θ 较大，在无人机运动时，由于相机小孔成像模型造成的空间几何误差较显著，需进行修正，否则可能无法满足测量精度要求，如图 3.5 b) 所示。

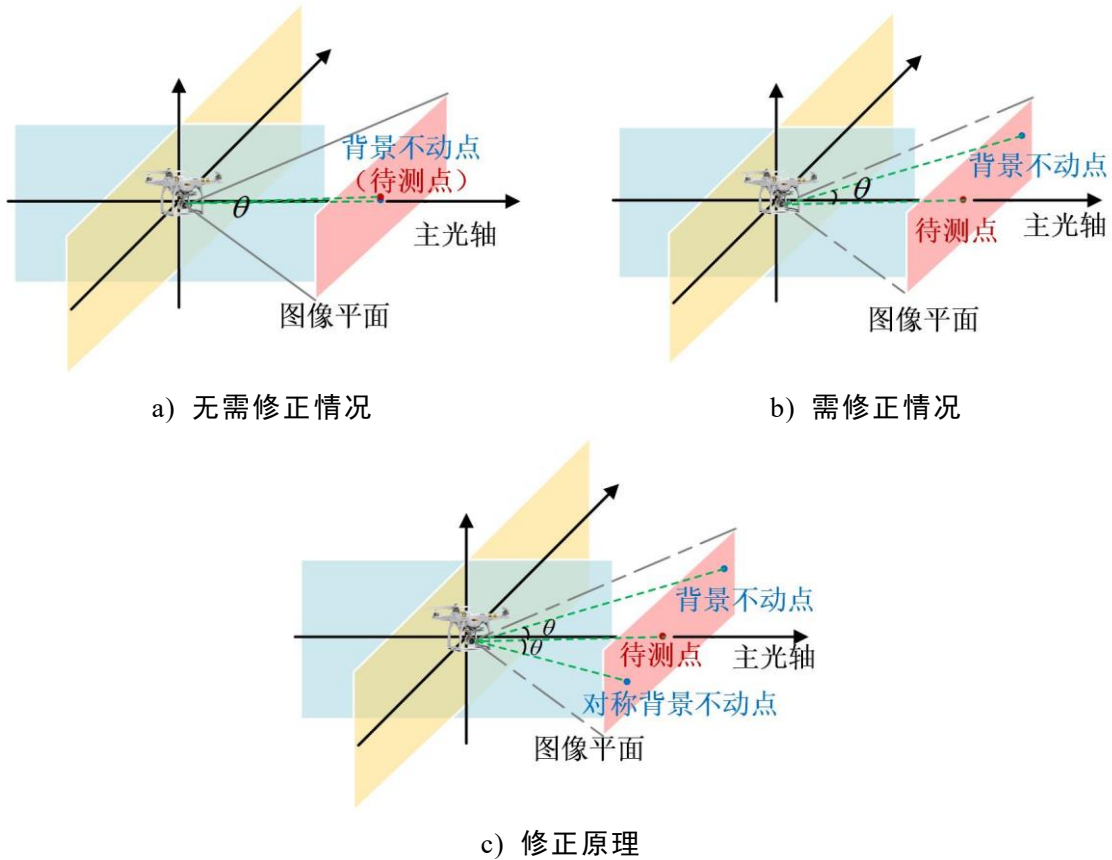


图 3.5 空间几何误差修正示意图

由于在实际工程中逐帧计算夹角并通过几何关系解算剔除该误差难以实现且运算量巨大，故本文提出了一种基于对称背景点的空间几何误差修正方法。该方法以待测结构为中心，选取一组对称的背景不动点，如图 3.5 c) 所示，由于两个不动点与相机和待测点之间的夹角 θ 相等，空间几何关系对两个背景不动点造成的误差形成互补关系，故可以通过对两个背景不动点的位移取算术平均消除该误差，经实验室试验验证，该方法能够有效修正空间几何误差。

立足以上理论，利用无人机采集结构运动视频后，即可通过以下流程计算结构的绝对位移：（1）通过数字图像相关算法分别追踪待测结构平面和背景不动点

的像素位移，即 x_i 和 x_i' ；(2) 基于 ArUco 编码标靶识别角点坐标，计算待测结构的变动尺度因子 k_i ；(3) 根据所提的背景不动点尺度因子的转换方法，求解背景不动点的变动尺度因子 k_i' ；(4) 基于背景不动点理论根据公式(3.1)计算结构绝对位移；(5) 基于对称背景不动点修正空间几何误差。完整方法流程如图 3.6 所示。

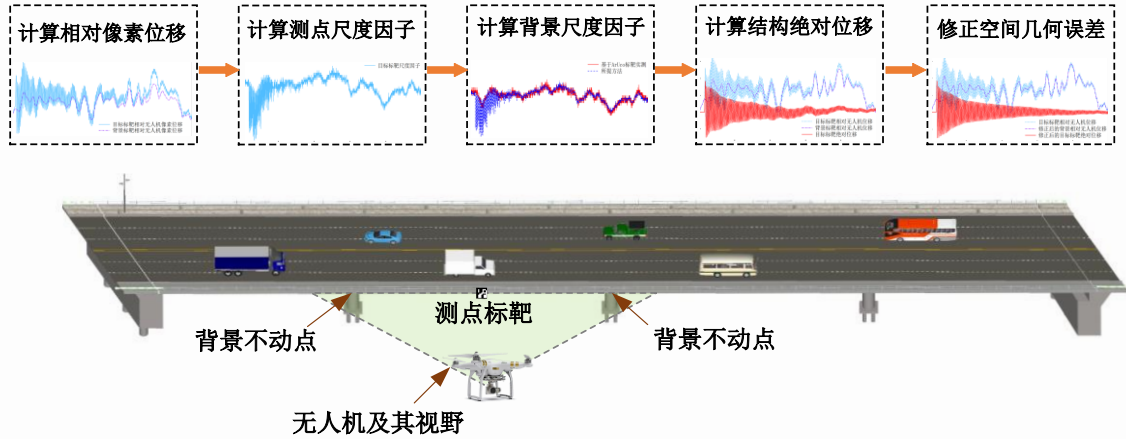


图 3.6 基于单目无人机的结构动态位移测量方法流程图

3.6 实验室钢框架模型试验验证

为验证所提的基于单目无人机的结构动态位移测量方法的有效性和稳定性，本节开展了实验室钢框架模型结构动态位移测试。将所提方法测得的位移与激光位移计和固定相机对比，测试其精度；通过控制无人机悬停距离，测试了距离因素对该方法精度影响。

3.6.1 实验室钢框架模型试验概况

试验装置如图 3.7 所示。钢框架为 3 层 2 跨结构，整体长 1 m、高 1.6 m，底层高 0.6 m，其余两层高 0.5 m，框架柱间距为 0.5 m。框架焊接在 5 mm 厚的底板上，固定于地面上。

固定相机架设在距离框架结构大约 3.5 m 的平整地面上，相机型号为 Canon EOS 5D Mark4，传感器类型为 CMOS，变焦镜头焦距为 24-105 mm。视频采样频率设为 30 Hz，分辨率为 4096×2160。

无人机悬停位置距离框架结构大约 1.5 m，型号为大疆 Mavic2 Pro 专业版，录制视频时的焦距为 7.79 mm，像元尺寸为 2.41 μm ，视频采样频率设为 30 Hz，分辨率为 3840×2160。

激光位移计型号为基恩士 IL-300，采样频率为 50 Hz，基准距离为 300 mm，测量距离为 160-450 mm，重复精度为 30 μm 。

目标标靶尺寸为 100×100 mm，类型为 6×6 格式，标靶 ID 为 23；背景标靶尺寸为 100×100 mm，类型为 6×6 格式，标靶 ID 为 35。

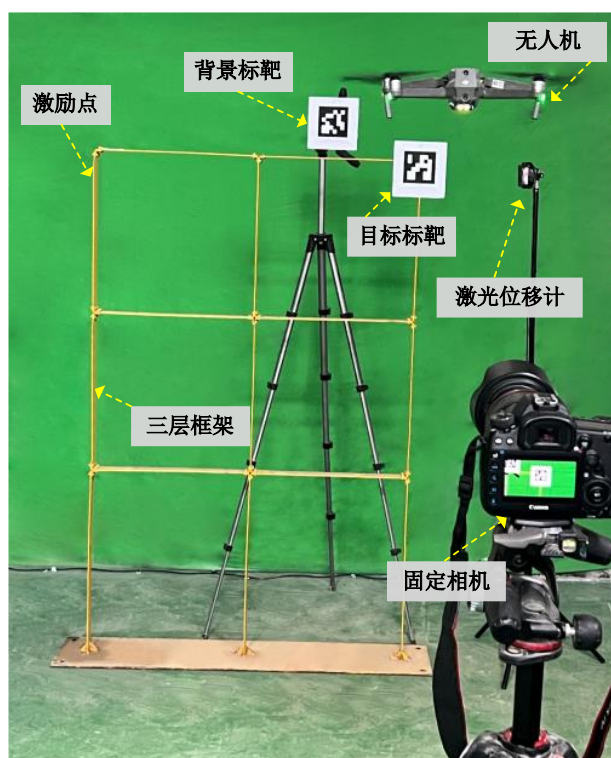


图 3.7 实验室钢框架模型试验装置

3.6.2 实验室钢框架模型试验精度验证

试验时，将无人机悬停在距离框架结构 1.5 m 左右的地方，调整镜头使待测结构平面平行于成像平面，并使两个标靶尽量成像在视野中央；调整固定相机的镜头焦距，使目标标靶清晰地成像于视野中央；将激光位移计固定在距离待测目标约 30 cm 的刚性支架上。对框架顶部施加初始位移，释放后，无人机、固定相机和激光位移计同步采集待测目标的运动信息，无人机和相机拍摄视角如图 3.8 所示。

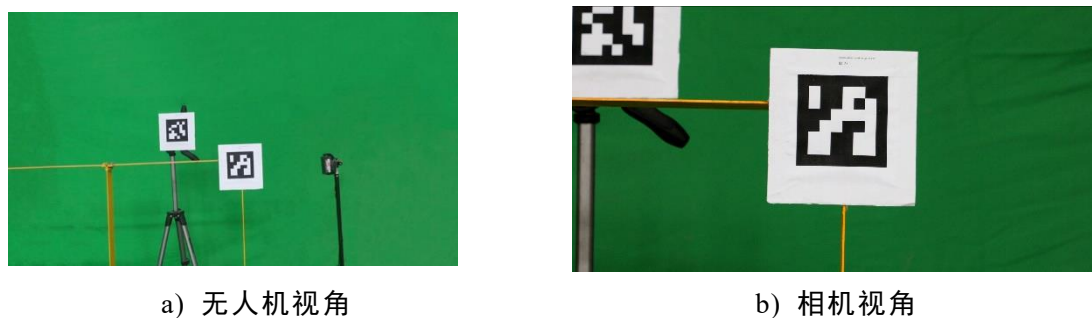


图 3.8 实验室钢框架模型试验拍摄视角

(1) 基于数字图像相关法的相对位移计算：分别选择目标标靶和背景标靶作为 ROI 区域，采用数字图像相关法追踪目标和背景不动点相对于无人机的像素位移如图 3.9 所示。图中背景标靶相对无人机像素位移即为无人机在平面内的像素位移，可以看出，无人机的自身运动对结构绝对位移的计算不可忽略。

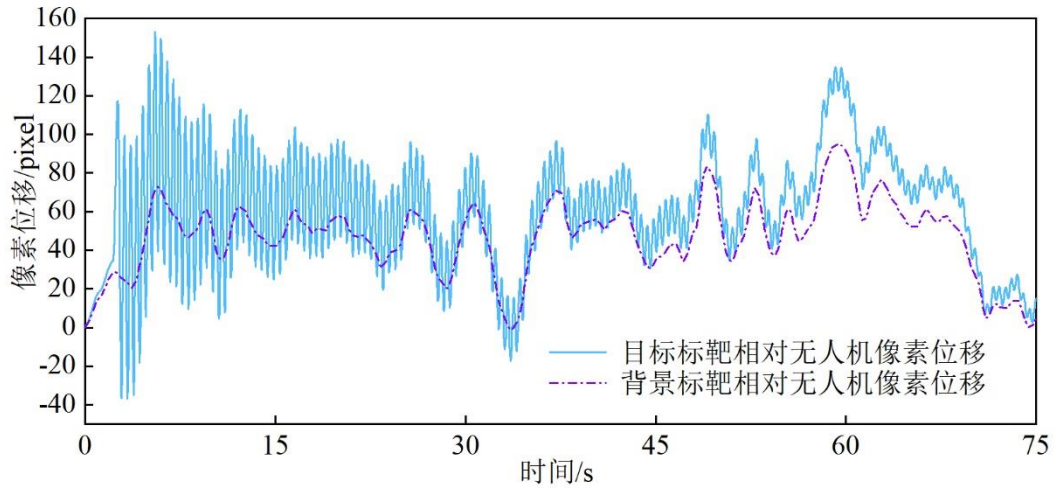


图 3.9 基于数字图像相关法的相对位移计算

(2) 基于 ArUco 编码标靶识别的测点尺度因子计算：首先基于 Python 进行目标 ArUco 标靶的角点检测，定位 4 个角点在图像坐标系下的坐标，如图 3.10 所示。检测到的各角点坐标变化时程曲线如图 3.11 所示。

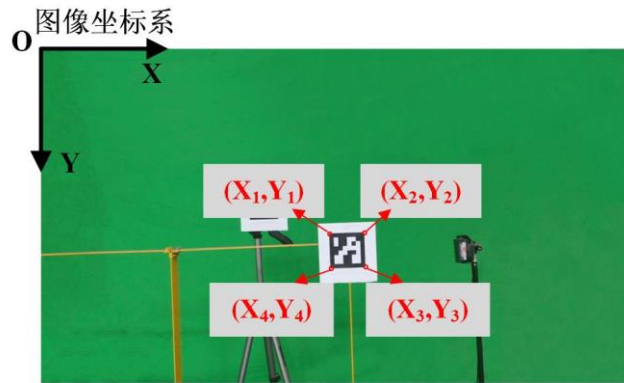
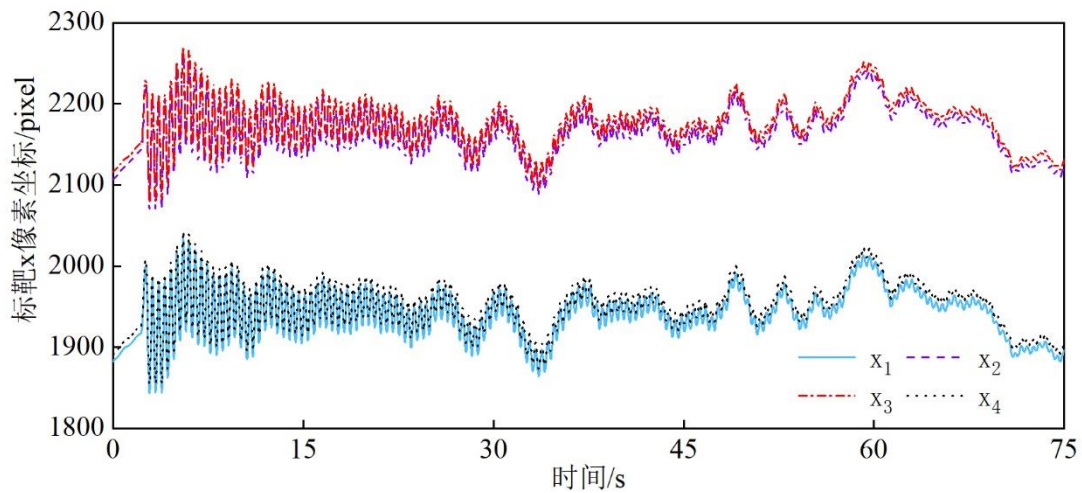
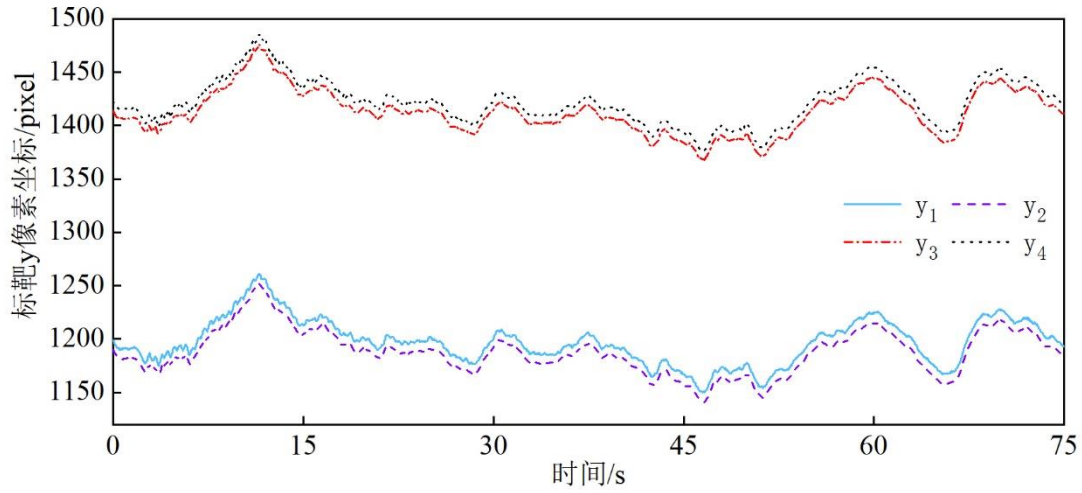


图 3.10 图像坐标系下角点坐标示意



a) 目标标靶 x 像素坐标



b) 目标标靶 y 像素坐标

图 3.11 目标标靶角点坐标检测

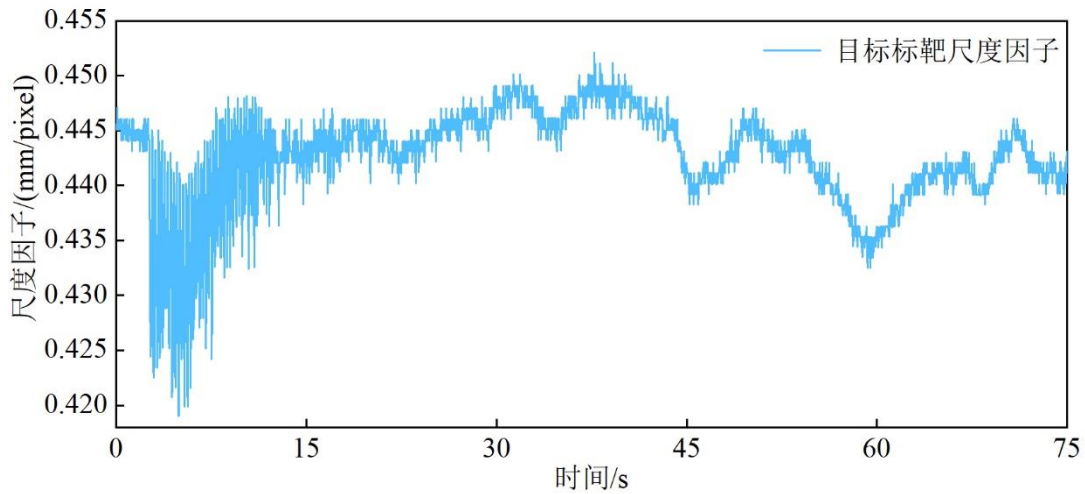


图 3.12 目标标靶的尺度因子

为了降低角点识别误差对尺度因子计算的影响，每一帧均取标靶 4 条边长的平均像素长度作为最终的像素长度，结合已知标靶的实际边长为 100 mm，根据式 (3.2)求得目标标靶的尺度因子如图 3.12 所示。由图可知，随着无人机在视频录制过程中靠近或远离结构运动，目标标靶的尺度因子会发生改变，证明了在结构位移测量中考虑该参数的必要性。

(3) 基于尺度因子转化法的背景尺度因子计算：采用本文提出的背景不动点尺度因子转换方法计算背景标靶的尺度因子。首先根据公式(3.4)和(3.5)，结合上面计算的目标标靶尺度因子计算了无人机在 Z 向的平面外位移，如图 3.13 所示。由图知，无人机在 Z 方向上位移漂移规律与尺度因子的变化规律类似，由于无人机自身定位精度为厘米级，故在室内无风环境下，其 Z 方向位移漂移高达 40 mm，因此对于室外实际工程而言，更应该考虑该参数。

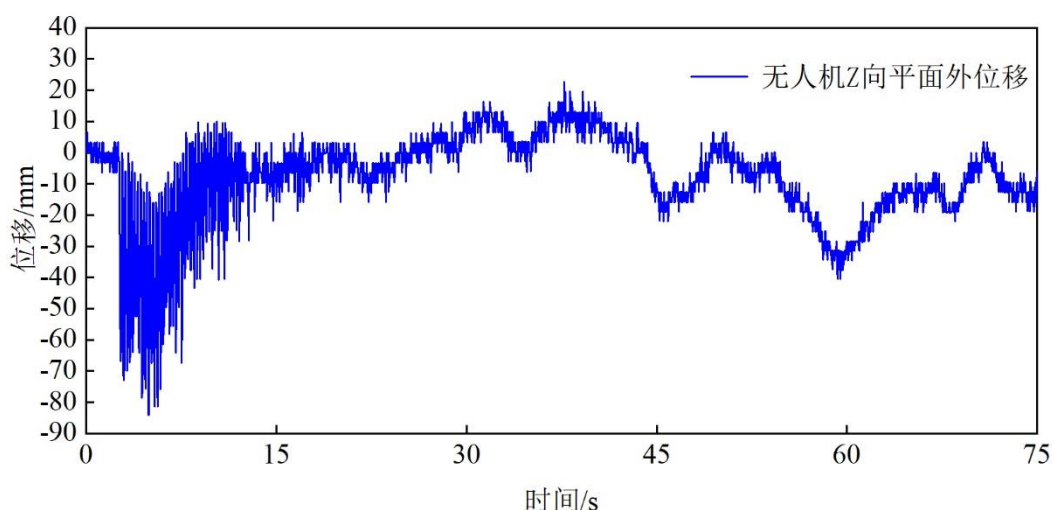


图 3.13 无人机 Z 向平面外位移

下一步根据公式(3.6)~(3.8)，计算背景标靶的尺度因子。为验证本文提出的尺度因子转换方法的有效性，将根据背景 ArUco 标靶识别角点计算的尺度因子作为真值，与所提方法进行对比，如图 3.14 所示。结论如下：

1) 所提方法能够在无需安装背景标靶的条件下有效推算背景不动点的变动尺度因子，计算结果与实测结果基本吻合；

2) 在 3-15 s 时间段内，所提方法计算结果与实测值相比存在较大波动，这是由于目标标靶在该时间段内水平向位移较大，由于相机小孔成像模型导致空间几何误差显著，在进行背景不动点尺度因子转换时不可避免地引入了该误差，进一步说明了在近距离测量时进行空间几何误差修正的必要性；

3) 在实际桥梁工程中，为使无人机视野中同时出现待测结构和背景不动点，无人机往往不会贴近悬停，且实际桥梁位移一般不会很大，故所提尺度因子转换方法在实际应用中受空间几何误差的影响不会像图中 3-15 s 那样显著；

4) 本文为验证性试验，故安装了背景标靶作为所提方法的验证，在实际工程中，背景不动点可以选在任意已知物理尺寸的自然结构上。

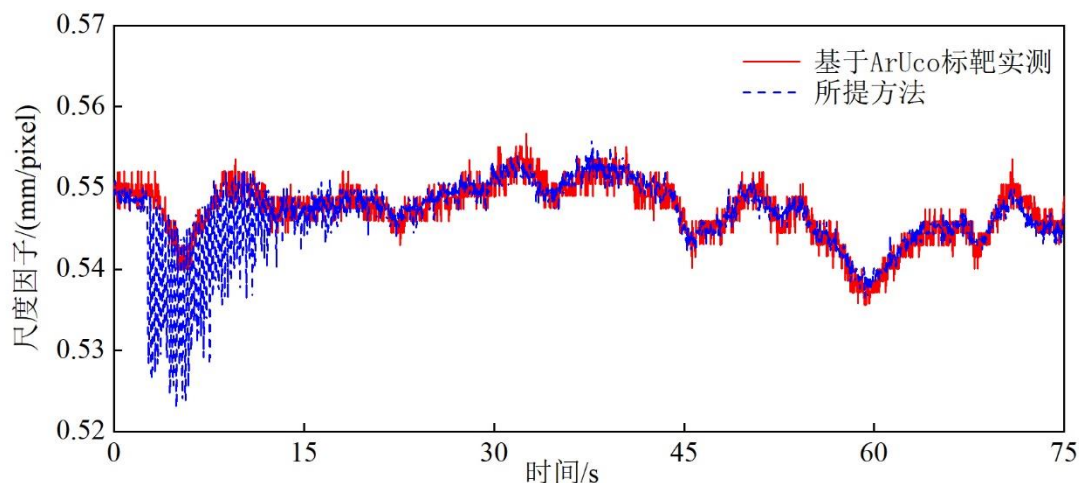


图 3.14 背景标靶的尺度因子验证

(4) 基于背景不动点理论的结构绝对位移计算：根据公式(3.1)计算目标标靶的绝对位移如图 3.15 所示，得到的结果基本符合结构衰减时程曲线的规律，但由于此时无人机距离结构平面较近，镜头、待测点、背景不动点之间的夹角较大，空间几何误差较显著，时程曲线出现了波动。

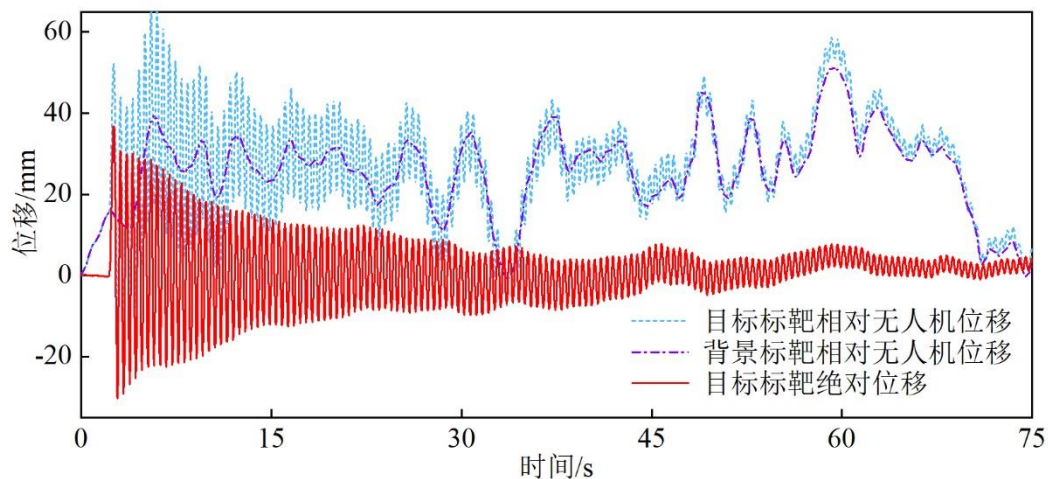


图 3.15 目标标靶的绝对位移

(5) 基于对称背景点的空间几何误差修正：同时考虑水平和竖直方向上的空间几何误差，在激光位移计固定支架上选取的对称背景点 ROI 区域如图 3.16 所示，取背景标靶和对称背景点的位移算术平均值作为最终背景不动点相对于无人机的位移，进而根据公式(3.1)计算目标标靶的绝对位移如图 3.17 所示。由图可知，所提出的基于对称背景点的空间几何误差修正方法能够显著降低时程曲线的波动性，提高测量的准确性。



图 3.16 对称背景点 ROI 区域选取

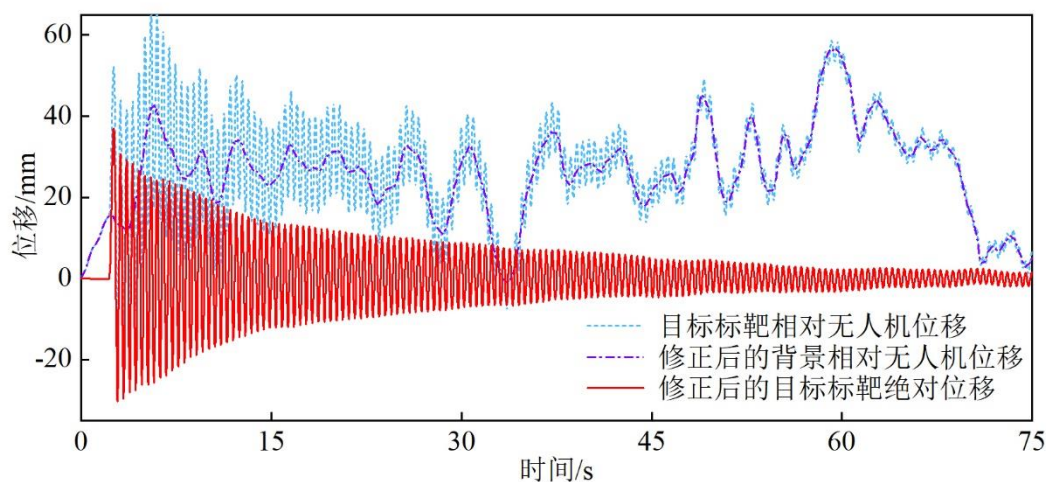


图 3.17 空间几何误差修正后的结构绝对位移

(6) 精度验证：将所提方法测得的目标靶的绝对位移与固定相机和激光位移计数据进行对比，如图 3.18 所示。由图可知，采用本文方法计算的位移与激光位移计和固定相机的结果吻合较好，波峰波谷处位移误差基本在 1 mm 以内，证明了本文方法进行位移计算的准确性。

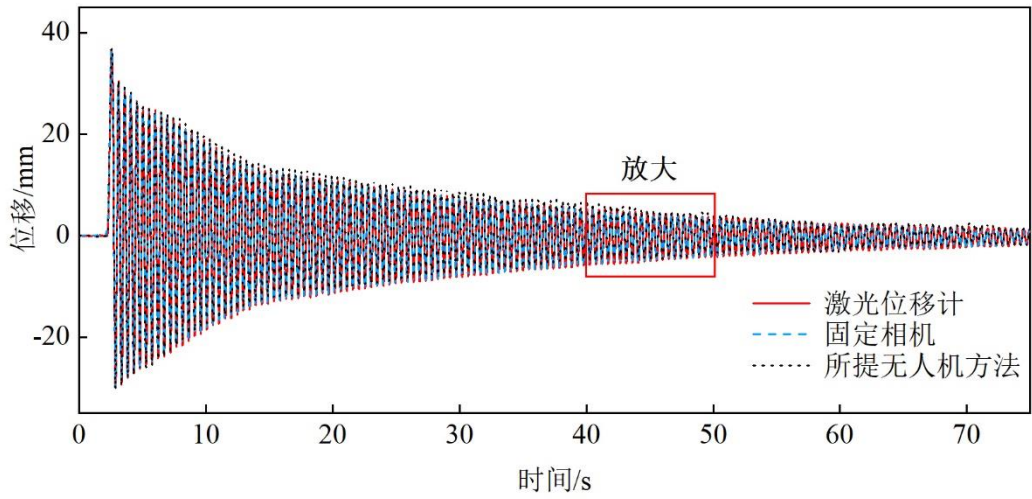
为了进一步说明所提无人机方法的测量优势，将所提方法与传统的不考虑变动尺度因子或不考虑空间几何修正的位移结果对比，如图 3.19 所示。传统方法测得的位移曲线与所提方法相比存在一定偏差，证明了逐帧更新尺度因子和修正空间几何误差的必要性。

为了量化所提方法的测量精度，使用均方根误差 (RMSE) 进行误差分析，计算公式见(3.9)。由于激光位移计、固定相机和无人机的采样频率不同，为了便于计算，提取了各自位移时程曲线对应的波峰波谷值，并将激光位移计的波峰波谷值作为真实值进行误差计算，计算结果见表 3.1。结果表明：

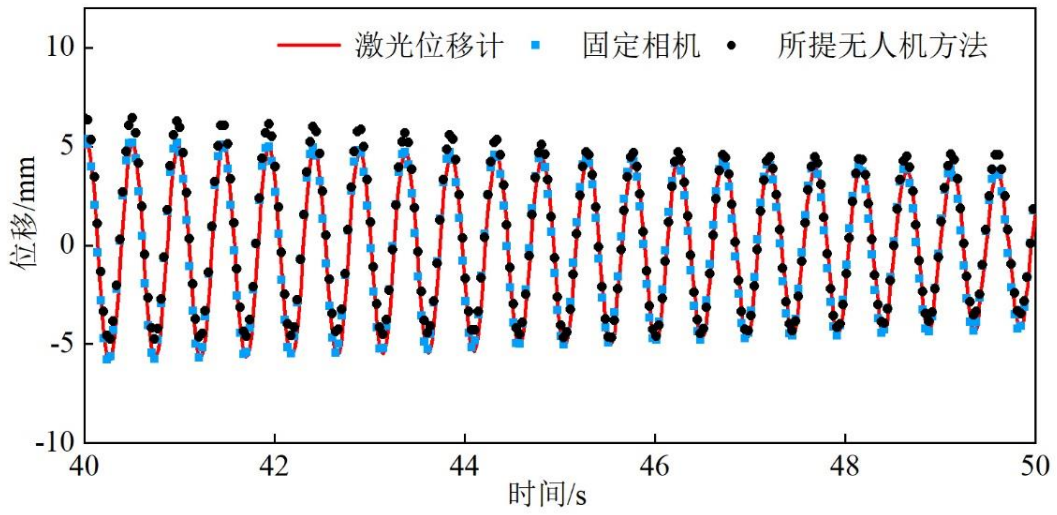
- 1) 固定相机的精度是最高的，均方根误差为 0.1077 mm；
- 2) 所提无人机测量方法的均方根误差为 0.7777 mm，远小于传统不考虑变动尺度因子或不考虑空间几何修正的策略，能实现毫米级位移测量；
- 3) 所提方法相比两种传统方法的测量误差分别降低了 56.58 %和 61.49 %，具有明显的测量优势。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.9)$$

式中， n 为样本数量，即取样的位移时程曲线波峰波谷值总数； y_i 表示测量真实值，即激光位移计测得的波峰波谷值； \hat{y}_i 表示测量预测值，即分别采用所提无人机方法和固定相机方法测得的波峰波谷值。



a) 位移时程曲线



b) 放大视图

图 3.18 位移测量结果对比

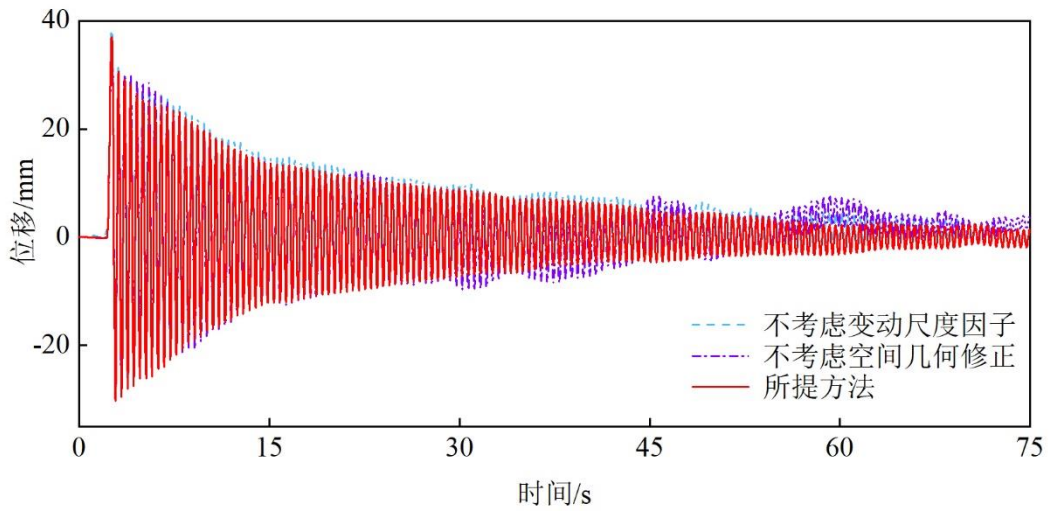


图 3.19 不同方法的测量结果对比

表 3.1 不同方法的测量误差对比

	固定相机	所提无人机方法	不考虑变动尺度因子	不考虑空间几何修正
RMSE/mm	0.1077	0.7777	1.7913	2.0198
误差降低比例	-	-	-56.58 %	-61.49 %

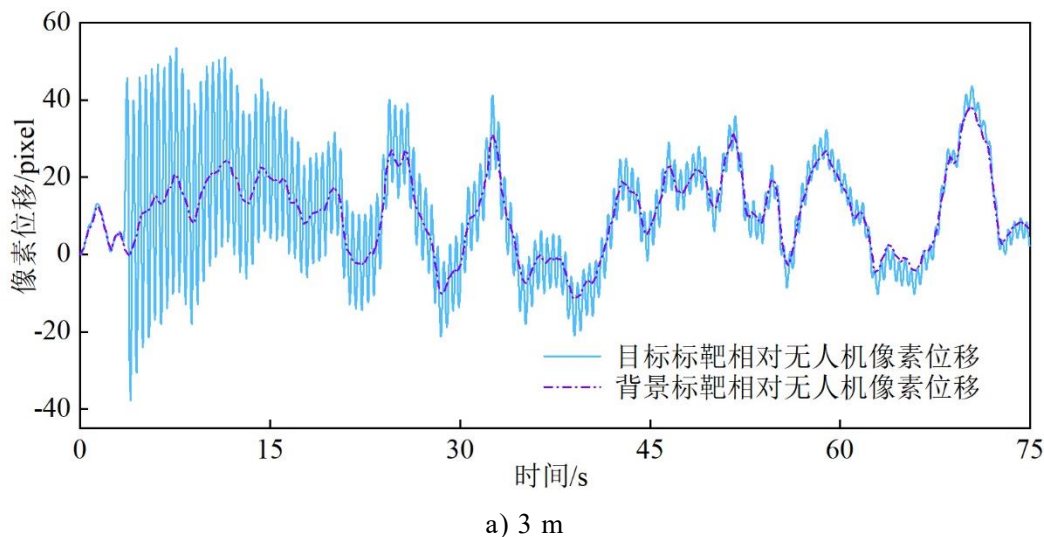
3.6.3 测量距离对精度的影响

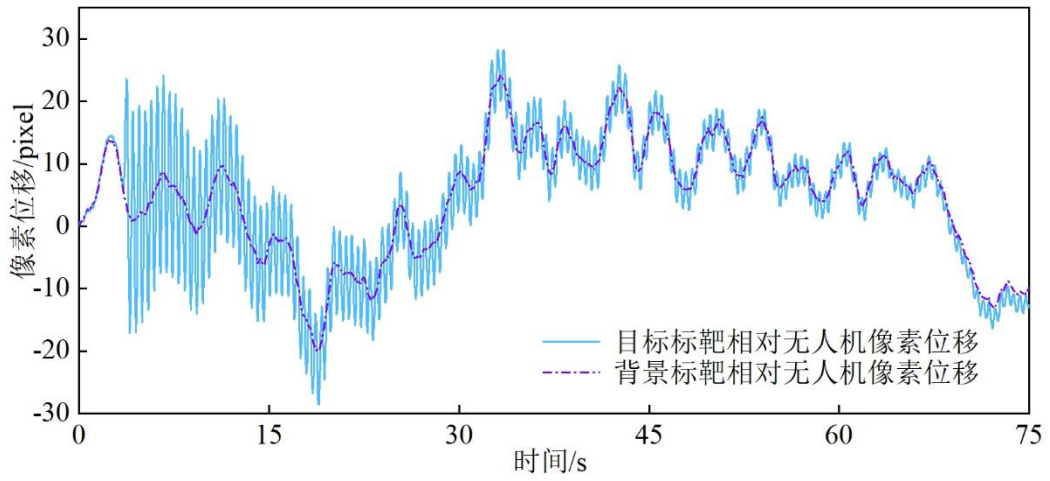
为探究无人机测量距离对精度的影响，另外预设了两组测距（分别为 3 m 和 5 m），两种测距下的无人机视角如图 3.20 所示。每种测距下均对框架顶部施加初始位移并释放，分别采用无人机、固定相机和激光位移计同步采集待测目标的运动信息。利用本章提出的基于单目无人机的结构动态位移测量方法分别计算两种测距下的结构绝对位移，并与激光位移计和固定相机结果进行对比，测试所提方法在不同测距下的测量精度。



图 3.20 两种测距下的无人机视角

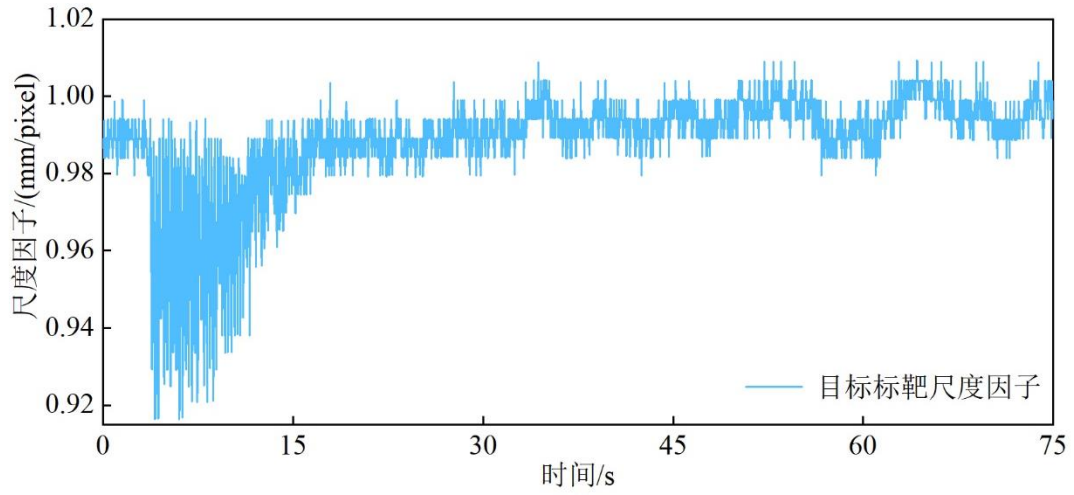
首先，基于数字图像相关法计算两种测距下目标标靶和背景标靶相对无人机的像素位移（图 3.21）；其次基于 ArUco 编码标靶识别目标标靶的变动尺度因子（图 3.22）；然后根据所提的尺度因子转换方法计算背景标靶的变动尺度因子（图 3.23）；接着基于背景不动点理论计算目标标靶的绝对位移（图 3.24）；最后基于对称背景点修正空间几何误差，修正后的绝对位移如图 3.25 所示。



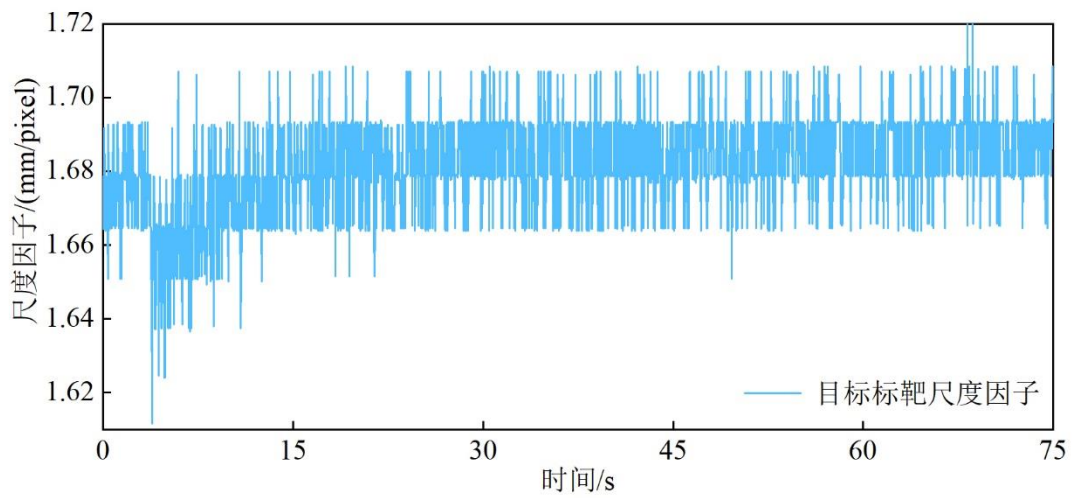


b) 5 m

图 3.21 两种测距下的相对像素位移

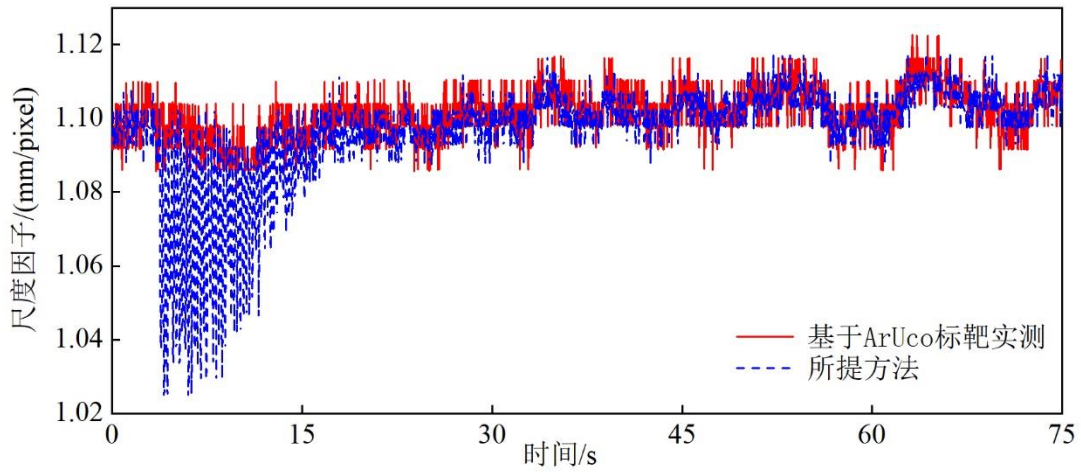


a) 3 m

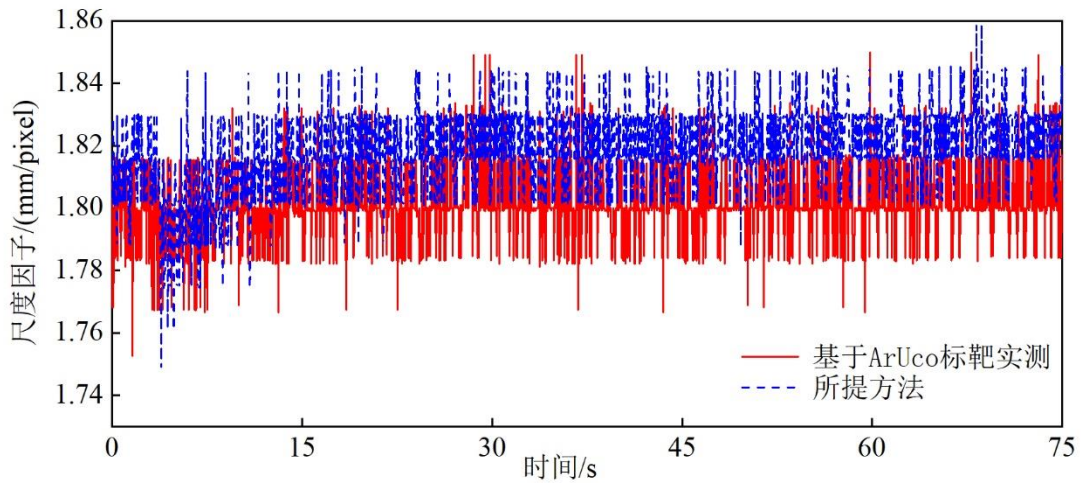


b) 5 m

图 3.22 两种测距下的目标靶尺度因子

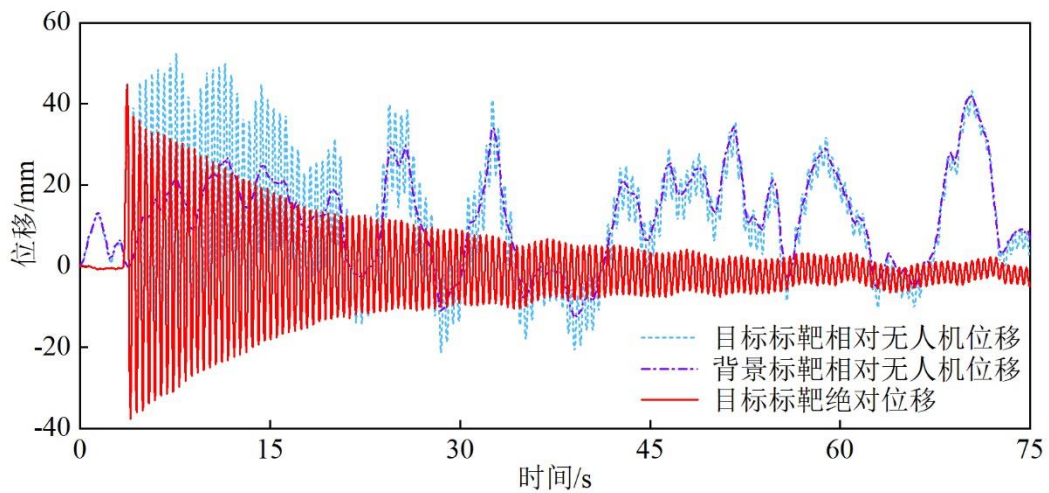


a) 3 m

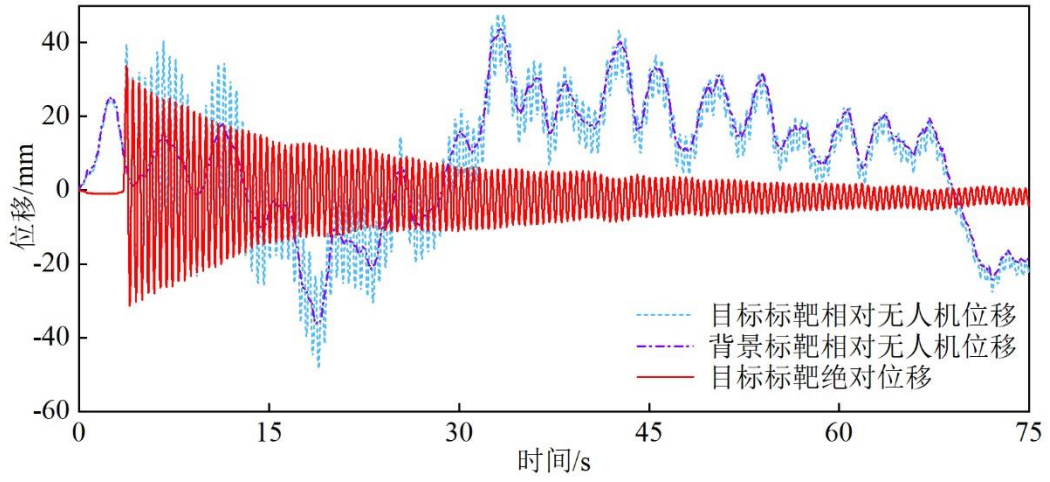


b) 5 m

图 3.23 两种测距下的背景标靶尺度因子

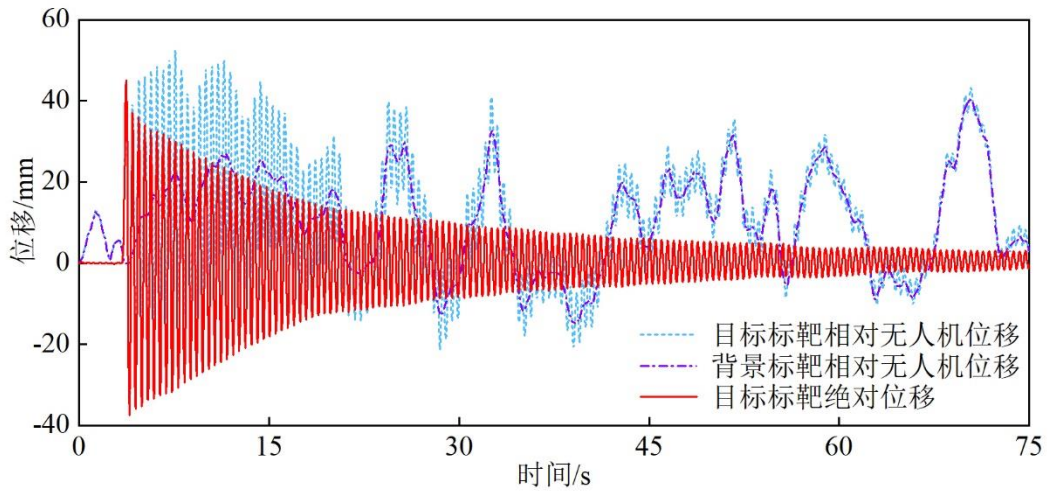


a) 3 m

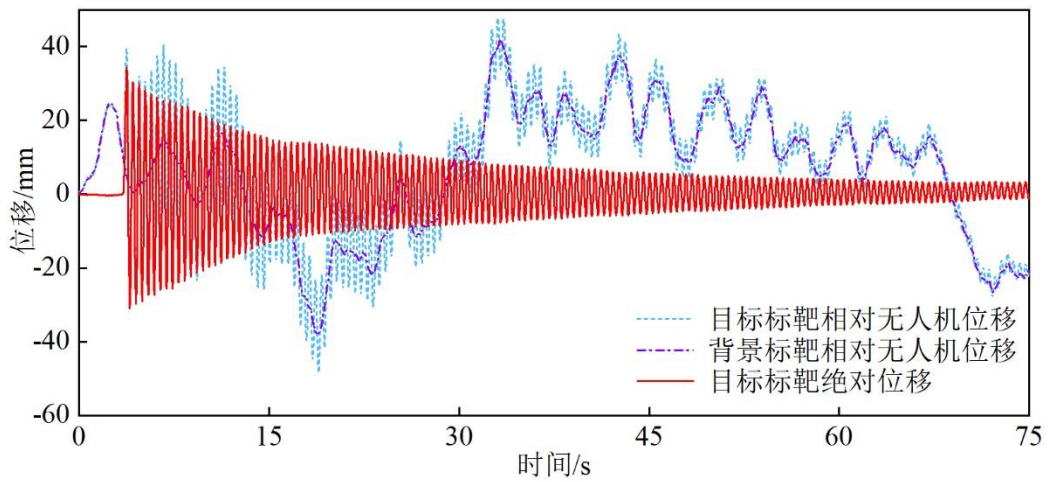


b) 5 m

图 3.24 两种测距下的目标标靶绝对位移



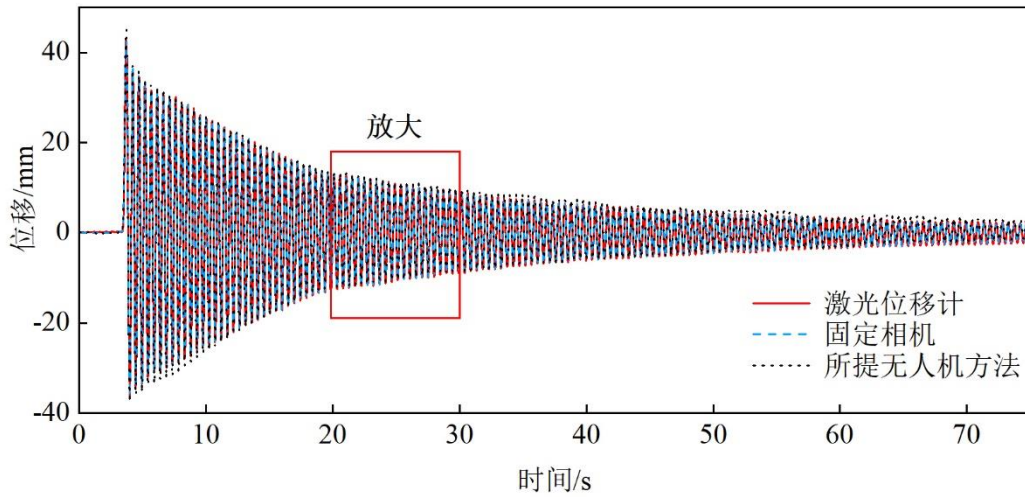
a) 3 m



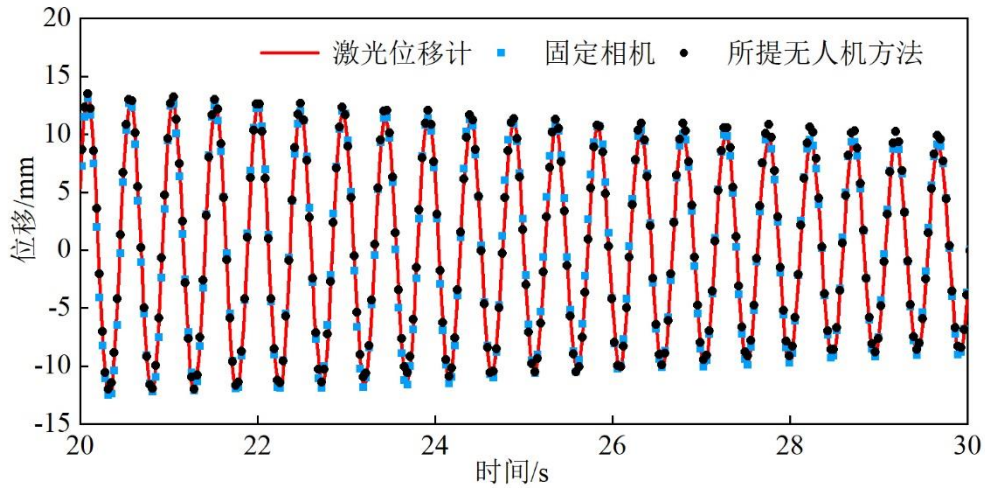
b) 5 m

图 3.25 修正后的两种测距下的目标标靶绝对位移

分别将两种测距下计算的结构绝对位移与激光位移计和固定相机结果进行对比,如图 3.26 和图 3.27 所示。结果表明,两种测距下所提方法均能有效测量结构的动态位移,3 m 测距下波峰波谷误差基本在 1 mm 以内,5 m 测距下波峰波谷误差基本在 1.5 mm 以内,具有一定稳定性。值得注意的是,在 5 m 测距下测试时相机由于内存原因只录制了 36 s 的视频,但该段视频足以验证激光位移计结果的准确性,并且测试结果以激光位移计结果作为真值,故不影响该测距下测量精度的验证。

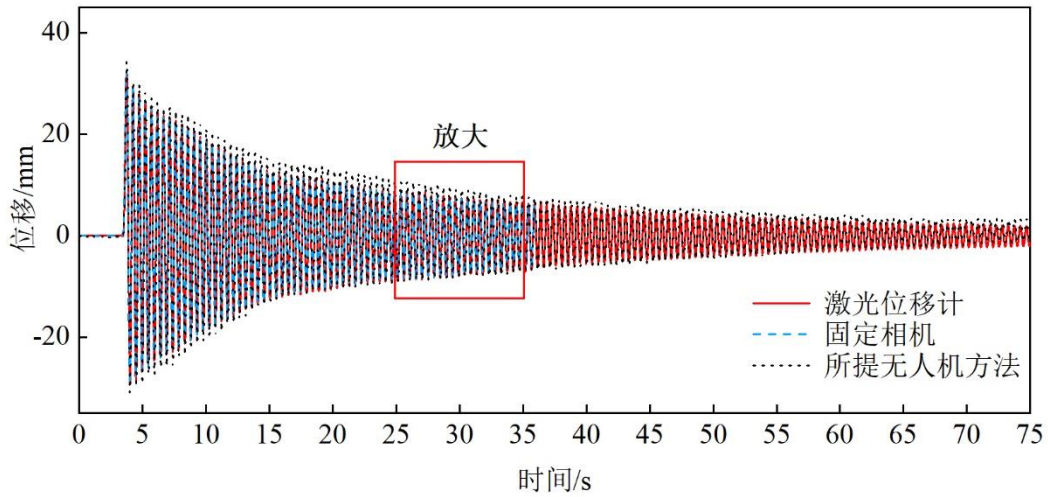


a) 位移时程曲线

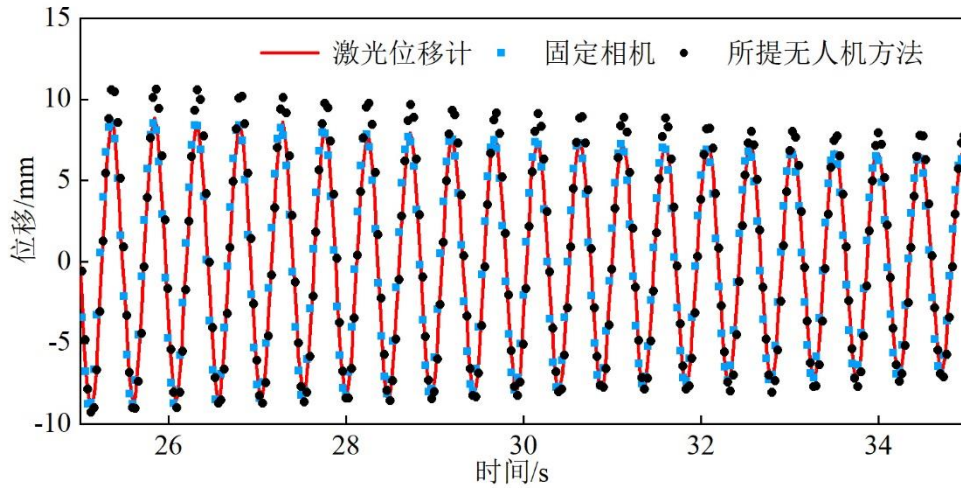


b) 放大视图

图 3.26 3 m 测距下位移测量结果对比



a) 位移时程曲线



b) 放大视图

图 3.27 5 m 测距下位移测量结果对比

为了量化不同测距下所提方法的测量精度，分别计算了 1.5 m、3 m、5 m 测距下的均方根误差（RMSE），如表 3.2 所示。得到的主要结论如下：

(1) 所提无人机测量方法在不同测距下均能稳定测量结构动态位移，能够满足测量精度要求；

(2) 无人机近距离测量精度不仅与测量距离导致的位移算法误差有关，还与空间几何误差有关。测距越远，测量距离带来的位移算法误差越大而空间几何误差越小，故在修正空间几何误差之前，位移时程曲线的波动性随测量距离的增加而减小，如图 3.15 和图 3.24 所示。

(3) 当无人机距离较近时，空间几何误差影响更显著，故 3 m 测距时的测量误差略小于 1.5 m 测距；当无人机测距进一步加大时，测量距离引起的位移算法影响更显著，故在 5 m 测距下的测量误差大于 3 m 测距。

(4) 尺度因子对位移计算造成的影响随测距的增大而减小，如图 3.14 和 3.23

所示。分析原因是测距越远，无人机 Z 向位移相对于物距的比例更小，尺度因子变化越不敏感，故在实际工程远距离测量结构绝对位移时，可认为尺度因子不变。

表 3.2 不同测距下测量误差对比

测距/m	RMSE/mm		误差提高比例
	固定相机	所提无人机方法	
1.5	0.1077	0.7777	-
3	0.1171	0.7439	-4.35 %
5	0.1535	1.2538	61.22 %

3.7 本章小结

本章基于背景不动点理论，提出了一种基于单目无人机的结构动态位移测量方法。通过实验室试验验证了所提方法的有效性，通过控制无人机悬停位置研究了测量距离对精度的影响。主要结论如下：

(1) 研究了无人机悬停时的位移漂移规律，针对无人机空间 3 自由度位移漂移分别给出了补偿策略。首先，基于数字图像相关法和背景不动点理论补偿无人机平面内位移漂移；其次，基于 ArUco 编码标靶逐帧更新尺度因子补偿无人机平面外位移漂移，并在该部分特别提出了一种背景不动点尺度因子转换方法，无需安装和识别背景标靶也能实现背景尺度因子的更新；最后，基于对称背景不动点修正空间几何误差得到结构的绝对位移。

(2) 通过实验室试验验证了所提方法的有效性。结果表明，该方法能够准确测量结构动态位移。与固定相机和激光位移计相比，测得钢框架模型的位移时程曲线基本吻合。所提方法的均方根误差远小于传统的不考虑变动尺度因子或不考虑空间几何误差的测量策略，具有精度上的优势。

(3) 通过控制无人机悬停位置研究了测量距离对精度的影响。结果表明，所提无人机测量方法在不同测距下均能有效且稳定地测量结构动态位移；无人机近距离测量精度不仅与测量距离引起的位移算法误差有关，还与空间几何误差有关。在实际工程中应用中应综合考虑两种因素，以提高测量精度。

第4章 基于无人机载双相机的结构动态位移测量

4.1 引言

上一章详细介绍了基于单目无人机的结构动态位移测量方法和测试效果，在近距离工作条件下，该方法能够有效地实现结构动位移测量。然而在实际桥梁工程背景下，背景不动点可能会距离待测目标较远，要想视野中同时出现待测目标和背景不动点，无人机悬停距离可能较远，一方面导致了视觉算法精度的下降，另一方面 ArUco 标靶在图像中占有的像素较少时会无法识别，限制了单目无人机的工程应用范围。本章提出了一种基于无人机载双相机的结构动态位移测量方法。该方法使用无人机搭载同轴双相机，其中长焦镜头拍摄待测结构，广角相机拍摄背景不动点，结合双相机的标定关系补偿无人机空间位移漂移，从而求解待测结构的绝对位移^[75]。长焦相机的应用有效解决了 ArUco 标靶的远距离识别问题并提高了视觉测量精度，广角相机的应用增大了视场范围更利于背景不动点的选择，使得该方法具有更广阔的工程应用前景。

4.2 基于双相机的无人机空间位移漂移补偿

本章采用的双相机系统测量原理如图 4.1 所示。首先通过长焦相机测量无人机相对测点的位移；然后通过广角相机测量无人机相对背景不动点的位移；最后根据双相机的标定结果计算待测结构的绝对位移。具体理论推导如下：

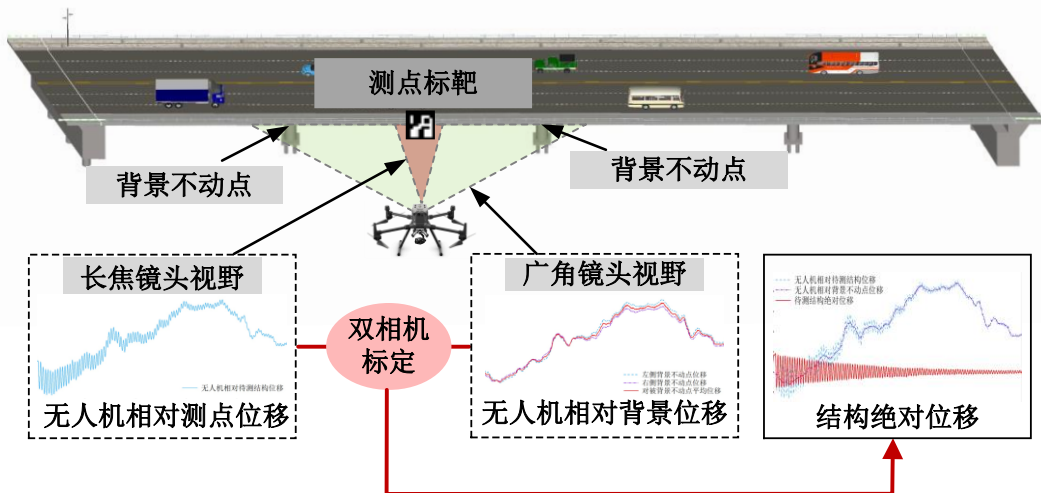


图 4.1 双相机系统测量原理

(1) 对于长焦相机：根据 3.3 和 3.4 节的理论，仅考虑结构的一维位移测量时，设第 i 帧测量的待测目标的位移为 ΔY_i^A ，根据尺度因子相机标定法有：

$$\Delta Y_i^A = K_i^A \Delta y_i^A \quad (4.1)$$

式中， K_i^A 表示第*i*帧待测目标的尺度因子，基于ArUco编码标靶逐帧更新计算； Δy_i^A 为第*i*帧待测目标的像素位移，基于数字图像相关算法计算。

(2) 对于广角相机：同理，第*i*帧测量的背景不动点的位移为 ΔY_i^B 可由下式计算：

$$\Delta Y_i^B = K_i^B \Delta y_i^B \quad (4.2)$$

式中， K_i^B 表示第*i*帧背景不动点的尺度因子，基于第三章所提的背景不动点尺度因子转换方法计算； Δy_i^B 为第*i*帧背景不动点的像素位移，基于数字图像相关算法计算。

当镜头、待测结构、背景不动点的夹角过大时，此处应考虑空间几何误差修正，根据第三章所提的基于对称背景不动点的空间几何误差修正方法，采用公式(4.2)同时计算一组对称背景不动点的位移后取算术平均值，作为最终的无人机相对背景不动点的位移。

(3) 双相机标定：由于长焦相机和广角相机经过集成固连于一体，故双相机坐标系之间的关系为：

$$Y_i^A = R^{A,B} Y_i^B + T^{A,B} \quad (4.3)$$

式中， Y_i^A 和 Y_i^B 分别表示第*i*帧长焦相机和广角相机中相同点的坐标； $R^{A,B}$ 和 $T^{A,B}$ 分别表示双相机之间的旋转平移矩阵。由于平移关系与绝对位移无关，因此双相机之间的位移传导只与旋转矩阵 $R^{A,B}$ 有关，故补偿无人机悬停时的空间漂移后，待测结构的绝对位移 Δy_i 表达式如下：

$$\Delta y_i = K_i^A \Delta y_i^A - R^{A,B} K_i^B \Delta y_i^B \quad (4.4)$$

接下来对本章采用的双相机系统进行旋转矩阵 $R^{A,B}$ 的标定试验：双相机无人机系统如图4.2所示。无人机型号为大疆M300RTK，双相机型号是大疆禅思H20T，它集成广角镜头和长焦镜头于一体，并通过三轴云台搭载于无人机上。



图 4.2 双相机无人机系统

采用张正友标定法基于MATLAB工具包进行双相机标定。棋盘格标定方格边长为20mm，利用该系统从不同角度采集棋盘格图像共75次，每次采集时长焦相机和广角相机同时拍摄，故共采集到150张图片。将图片导入MATLAB进行分析，图4.3是某时刻采集时，两相机同时拍摄到的棋盘格角点检测和重投影情况。

最终 75 组采集图像计算的角点重投影误差如图 4.4 所示，平均重投影误差为 0.44 pixel，误差较小，说明本次双相机系统的标定结果较准确。计算的两相机之间的旋转关系矩阵如下：

$$R^{A,B} = \begin{bmatrix} 0.9998 & 0.0174 & -0.0062 \\ -0.0173 & 0.9995 & 0.0264 \\ 0.0066 & -0.0263 & 0.9996 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

结果表明，长焦相机和广角相机之间近似平行排列，故直接将长焦相机测得的目标结构位移与广角相机测得的背景不动点位移做差，即可得到目标结构的绝对位移，表达式如下：

$$\Delta y_i = K_i^A y_i^A - K_i^B y_i^B \quad (4.6)$$

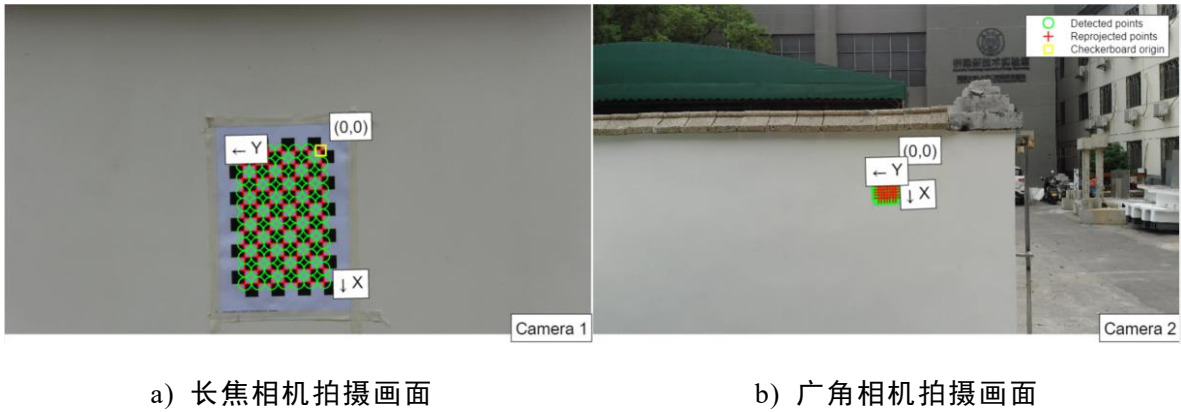


图 4.3 某时刻双相机标定角点检测和重投影情况

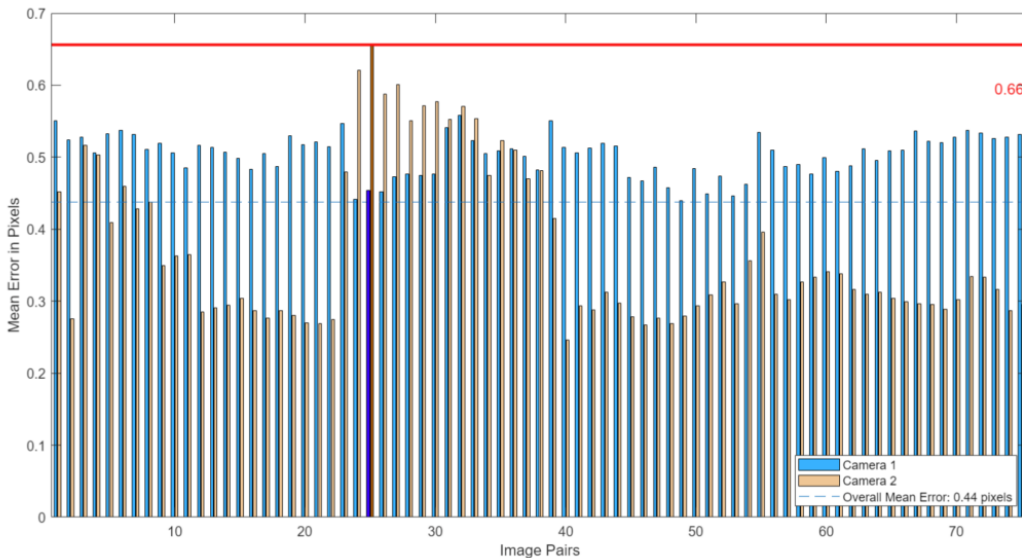


图 4.4 双相机标定重投影误差

4.3 室外钢框架模型试验

受限于实验室试验场地，同时为了测试该方法在自然环境影响下的鲁棒性，

故在室外钢框架模型上验证了所提方法的有效性。将该方法与固定相机测量结果进行对比，测试其精度。

4.3.1 室外钢框架模型试验概况

试验装置如图 4.5 所示，钢框架模型同第三章实验室试验。固定相机型号为 Canon EOS 5D Mark4，变焦镜头焦距为 24-105 mm，视频采样频率设为 30 Hz，分辨率为 1920×1080 ，架设在距离框架模型约 1.5 m 处。无人机型号为大疆 MRTK300，搭载禅思 H20T 镜头。其中，长焦镜头焦距为 6.83-119.94 mm，可实现 200 倍最大变焦，分辨率设为 3840×2160 ，视频采样频率为 30 Hz；广角镜头焦距为 4.5 mm，分辨率为 1920×1080 ，视频采样频率为 30 Hz。



图 4.5 室外钢框架模型试验装置

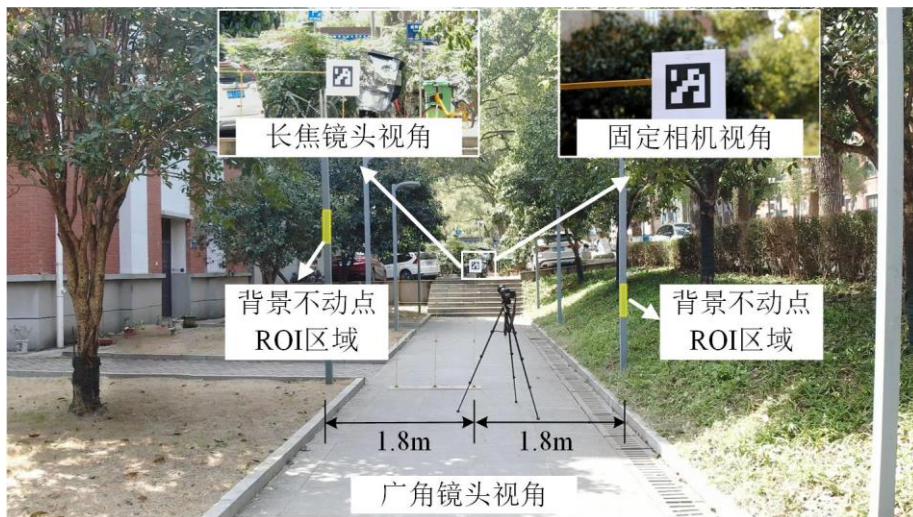


图 4.6 室外钢框架模型试验拍摄视角

测点布置在第三层框架右上角，采用的 ArUco 标靶尺寸为 10×10 cm，使用热熔胶固接于框架上。测试时，无人机悬停拍摄模式设为自由模式，此时无人机三轴旋转角不变且正对标靶平面，悬停点距离测点约 10 m。无人机广角镜头调整

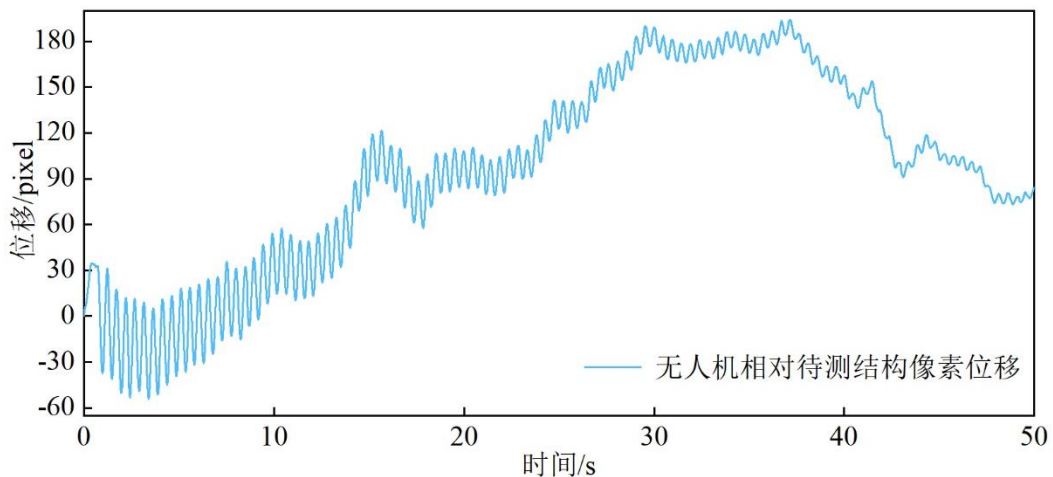
至同时拍到两侧固定灯柱；变焦镜头采用 5 倍变焦，使测点标靶清晰地呈现在视野中央；固定相机调整焦距至测点标靶呈现于视野中央。三个镜头的拍摄视角及选取的两侧背景不动点 ROI 区域如图 4.6 所示。

4.3.2 室外钢框架模型试验结果分析

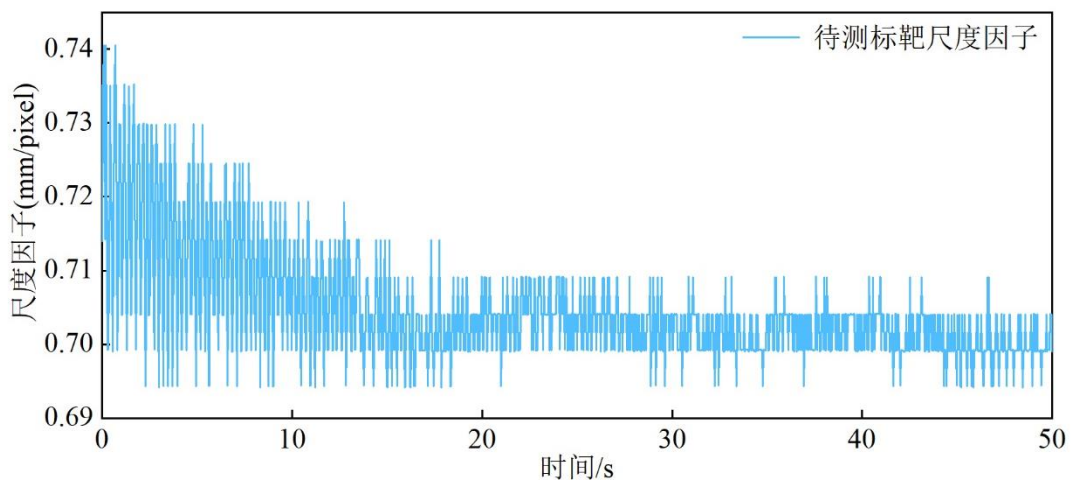
测试时，对框架顶部施加初始位移并释放，无人机和固定相机同步采集待测目标的运动信息，以固定相机测得的位移作为参考真值评估所提方法的测量精度。

(1) 长焦镜头拍摄待测结构的结果分析：采用数字图像相关法，选定待测标靶为 ROI 区域，计算得到无人机相对于待测结构的像素位移如图 4.7 a)所示；基于 ArUco 标靶识别角点计算的待测结构逐帧更新的尺度因子如图 4.7 b)所示；最终根据尺度因子标定法计算得到无人机相对于待测结构的位移如图 4.7 c)所示。

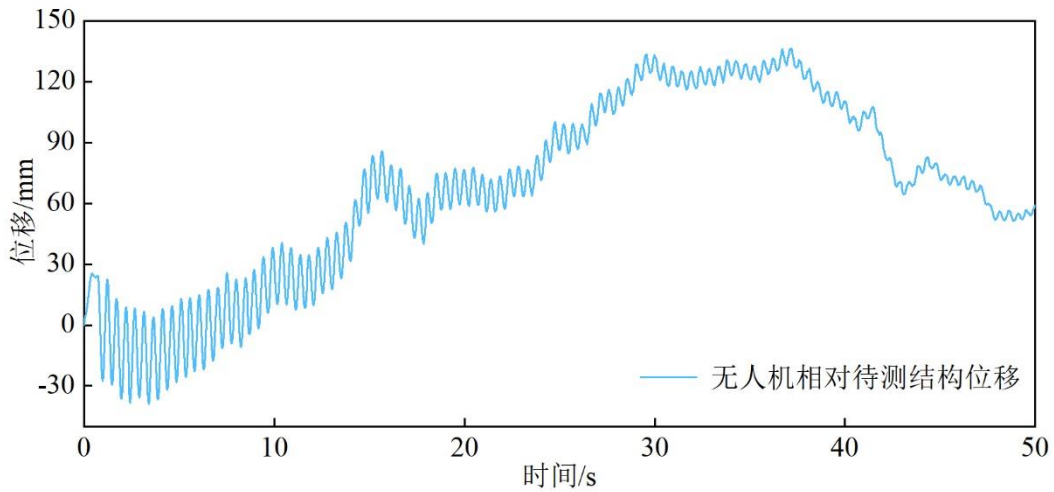
由图可知：1) 在 10 m 测距下，无人机靠近或远离待测结构引起的尺度因子变动不敏感，故无人机在远距离测量时，可以近似认为尺度因子是恒定的；2) 无人机自身平面内运动影响结构绝对位移的测量，不剔除该位移无法满足测量要求。



a) 无人机相对待测结构像素位移



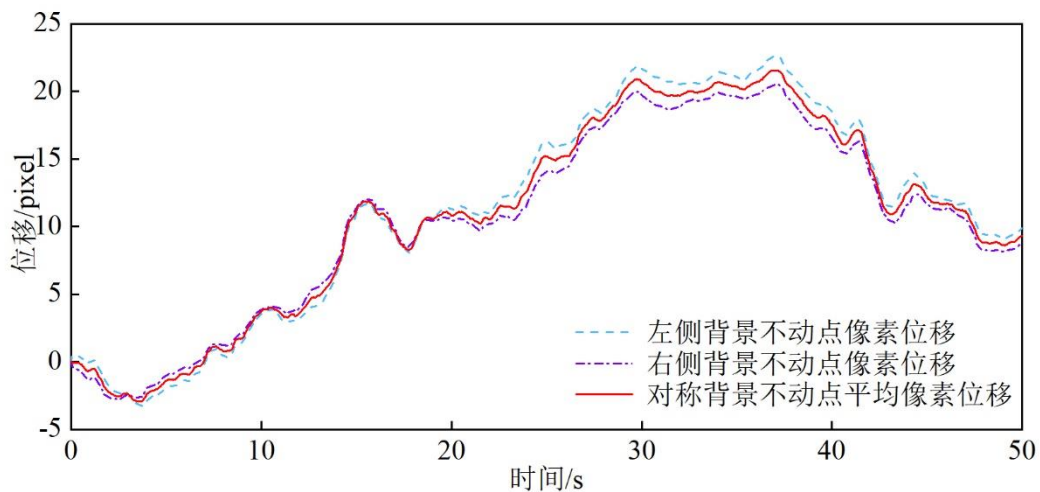
b) 待测结构变动尺度因子



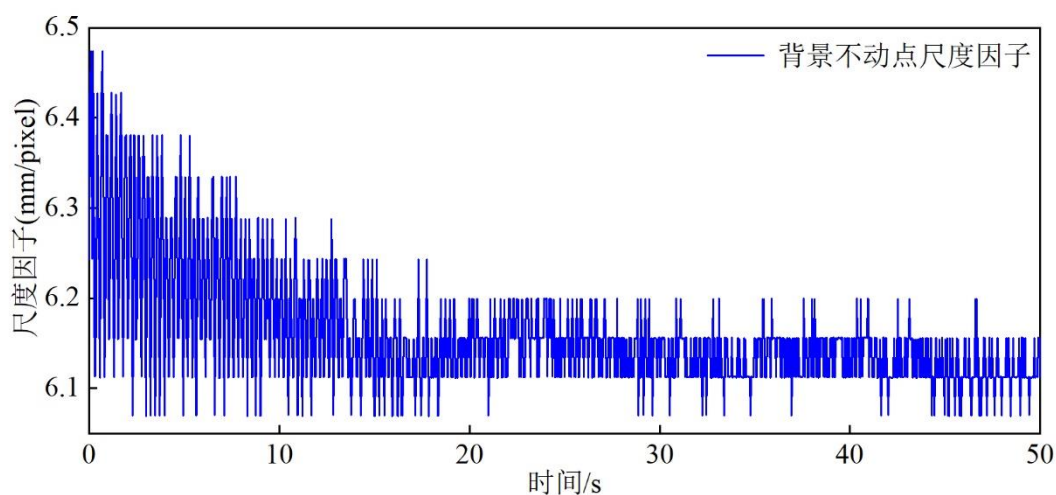
c) 无人机相对待测结构位移

图 4.7 长焦镜头拍摄待测结构结果

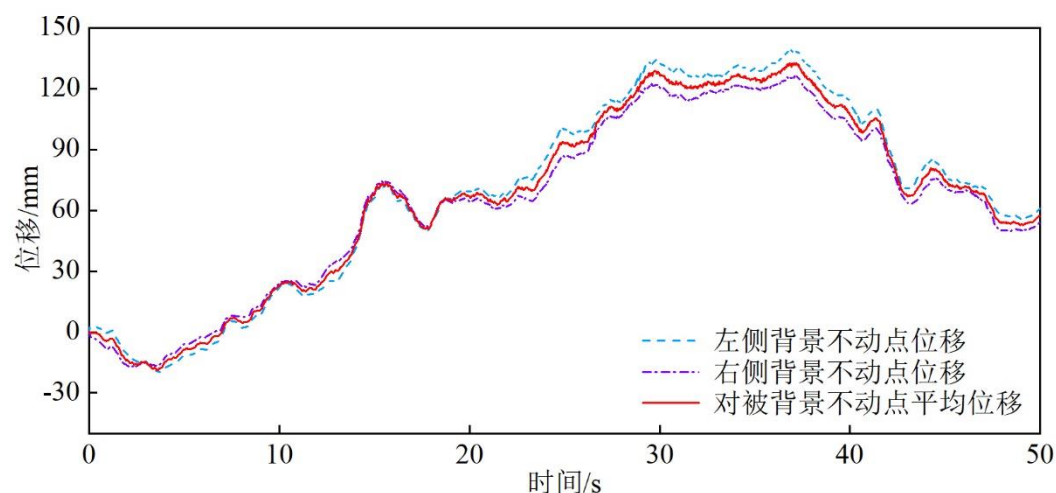
(2) 广角镜头拍摄背景不动点的结果分析：由于广角画面中背景不动点与待测结构距离较远，夹角较大，故必须考虑空间几何误差，选择图 4.6 所示的一组背景不动点（测点标靶与两侧背景不动点在同一平面上），根据 3.5 节提出的基于对称背景不动点的空间几何误差修正方法，将其位移的算术平均值作为最终的无人机相对背景不动点位移，反映无人机自身运动信息。基于数字图像相关法计算的两个对称的背景不动点像素位移及其平均值如图 4.8 a)所示；基于 3.4 节提出的背景不动点尺度因子转换方法计算的逐帧更新的尺度因子如图 4.8 b)所示；基于尺度因子标定法计算的无人机相对背景不动点位移如图 4.8 c)所示。由图可知，左右两侧背景不动点受空间几何视差影响显著，相差较大，若不修正空间几何误差，将无法满足测量要求。



a) 无人机相对背景不动点像素位移



b) 背景不动点变动尺度因子



c) 无人机相对背景不动点位移

图 4.8 广角镜头拍摄背景不动点结果

(3) 结构绝对位移计算：根据 4.2 节双相机的标定结果，将无人机相对背景不动点的位移直接从无人机相对待测结构位移中减去，即可得到结构的绝对位移如图 4.9 所示。可以看出，所提方法得到的位移时程曲线较好地反映了结构自由衰减趋势。将所提方法计算结果与固定相机结果进行对比如图 4.10 所示，可以看出所提无人机方法测得的结果与固定相机结果基本吻合，具有较高准确性。为了量化所提方法的误差，取固定相机测得的位移时程曲线的波峰波谷值作为真值，求得所提方法的 RMSE 误差为 0.6038 mm，能够实现毫米级位移测量。误差的主要来源是无人机在悬停过程中的位移漂移导致测点标靶并非稳定地维持在镜头主光轴上，空间几何误差的剔除不够完全，出现小范围波动，但仍能够满足工程测量精度要求。

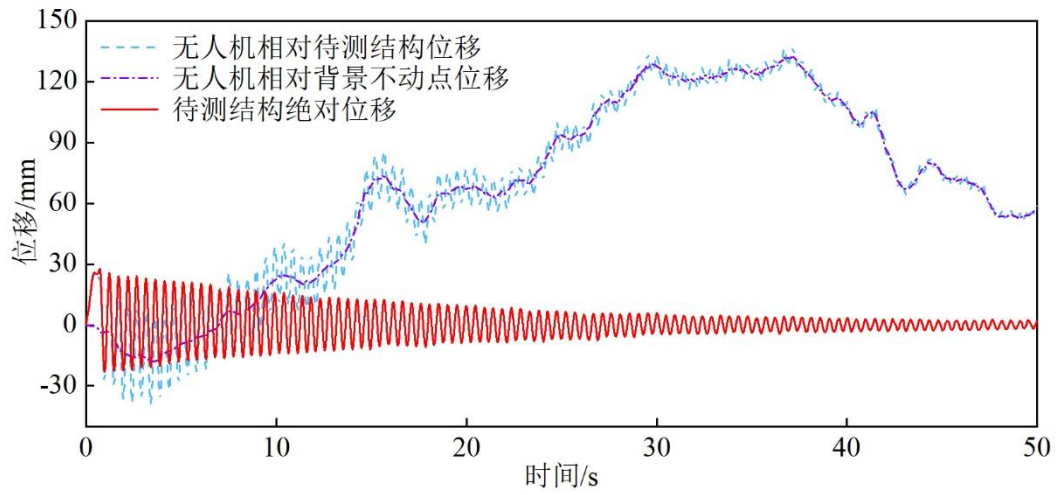
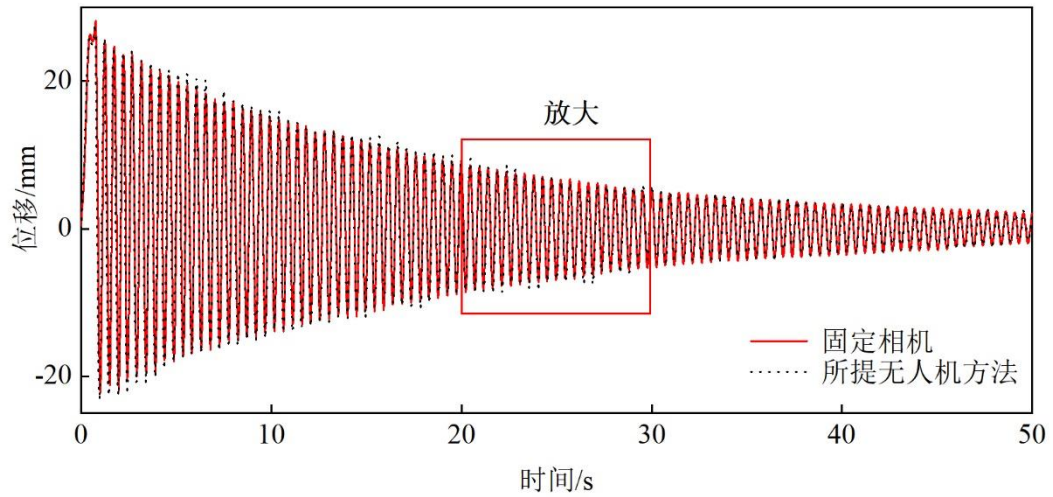
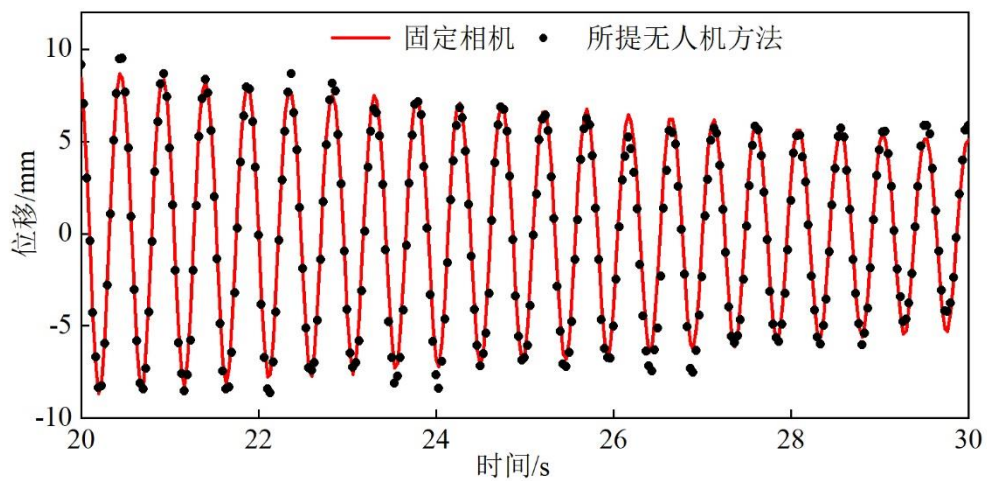


图 4.9 待测结构绝对位移



a) 位移时程曲线



b) 放大视图

图 4.10 所提方法与固定相机结果对比

4.4 野外实际桥梁试验

桥梁挠度是评估桥梁服役状态和安全性能的重要指标。为更全面、更准确地评估所提双相机无人机测量方法的工程实用价值，在室外钢框架模型试验的基础上，将所提方法进一步应用于一座在役桥梁，测量其在车辆荷载作用下的竖向位移。将所提方法与固定相机计算结果进行对比，分析其在实际工程环境下的测量精度和稳定性。

4.4.1 野外试验概况

如图4.11所示，选取的测试桥梁为长沙市洪山桥，位于长沙市东二环北段上，跨越浏阳河，至今已有二十年历史。该桥是目前世界上跨度最大的竖琴式无背索斜塔斜拉桥，也是世界上唯一高度超百米的混凝土斜塔桥。其主梁采用钢箱梁，挑梁间距4~5 m，主塔倾角 58° ，主塔桥面以上高度138 m，主跨长度206 m。



图 4.11 长沙市洪山桥

采用的位移测量系统如图 4.12 所示，其中固定相机型号为 Canon EOS 5D Mark4，变焦镜头焦距为 70-200 mm，视频采样频率设为 30 Hz，分辨率为 1920×1080 ；无人机型号为大疆 MRTK300，搭载禅思 H20T 镜头，视频采样频率为 30 Hz，广角镜头分辨率 1920×1080 ，变焦镜头分辨率 3840×2160 。



图 4.12 野外试验测量系统

测点布置在桥梁跨中，采用的 ArUco 标靶尺寸为 50×50 cm，使用螺栓固接

在桥侧栏杆上。测试时，无人机悬停在距桥梁约 50 m 处，拍摄模式设为自由模式，该模式下三轴旋转角不变，俯仰角设为 0° ，使其始终正对测点标靶。无人机广角镜头调整至同时拍到两侧固定支座；变焦镜头采用 40 倍变焦，使测点标靶清晰地呈现在视野中央；固定相机距离桥梁约 50 m 处，镜头焦距调整至 200 mm，瞄准测点标靶拍摄。三个镜头的拍摄视角及选取的对称背景不动点 ROI 区域如图 4.13 所示。

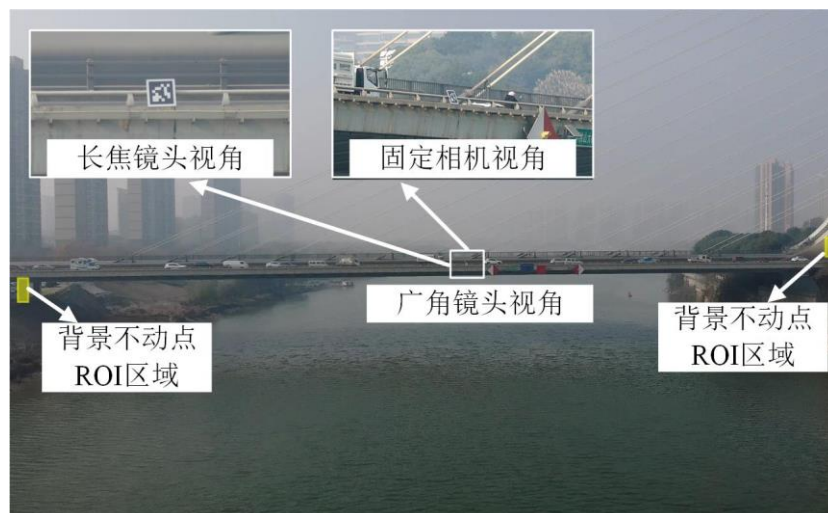


图 4.13 野外试验拍摄视角

4.4.2 野外试验结果分析

在车辆荷载作用下，采用本章提出的双相机无人机方法对桥梁跨中测点的竖向动位移进行测量，固定相机同步采集测点的运动信息。在结果处理中，由于无人机距离桥梁测点较远，尺度因子的变化不敏感，故近似认为尺度因子恒定；由于两侧支座距离测点较远，与镜头夹角较大，故取两侧对称支座的位移算术平均值作为背景不动点的参考位移值，降低空间几何误差和镜头畸变对测量结果影响。

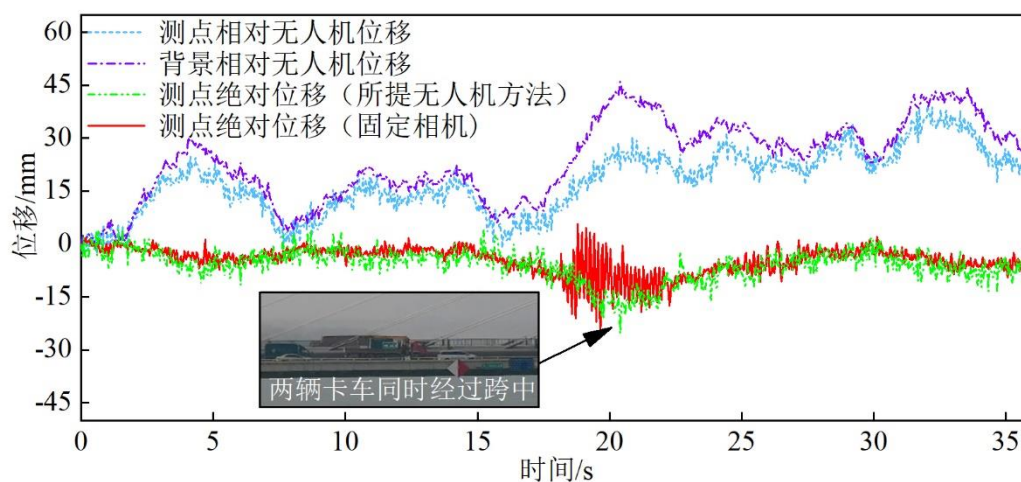


图 4.14 野外试验位移测量结果

图 4.14 显示了测试桥梁的竖向位移测量结果，包括背景不动点相对于无人机的位移、测点标靶相对于无人机的位移、所提无人机方法测量的测点绝对位移，以及固定相机测量的测点绝对位移。结果表明，所提方法能够有效且稳定地测量桥梁的竖向动位移，计算结果的趋势与固定相机结果基本吻合。为了进一步量化所提方法的测试精度，对计算结果采用 FFT 低通滤波处理后，进行 RMSE 误差计算，计算结果为 2.1828 mm。

根据无人机拍摄的视频，当桥梁出现明显的竖向位移时（约 20 s），有两辆卡车同时经过跨中（图 4.14），测得的位移时程曲线符合实际趋势。然而，在现场测试中，固定相机容易受到环境因素（如风、地面振动等）影响，造成位移测量误差，影响测量精度。因此，固定相机的结果可能无法准确揭示结构绝对位移，从而可能导致两条曲线之间的不一致，例如，18~23 s 时间段内，通过固定相机视频可以明显看到受环境风影响，画面振动，从而导致该时间段的位移曲线出现显著误差。故严格意义上应该增设更精确的对照组（例如布置接触式传感器），以精准评估所提方法的测试精度。

4.5 本章小结

本章提出了一种基于无人机搭载双相机的结构动态位移测量方法，采用无人机搭载同轴双相机，分别使用长焦相机和广角相机捕捉结构测点和背景不动点的运动信息，从而剔除无人机的基点运动，有效解决了单目无人机的视场局限问题，提高了位移测量的精度。得到结论如下：

（1）详细介绍了双相机无人机系统的测量原理。该系统由大疆 MRTK300 无人机搭载禅思 H20T 同轴双相机，其中双相机由广角相机和变焦相机组成。经过双相机标定系统证明了广角相机和变焦相机近似平行排列，故可以直接将广角相机测得的无人机相对于背景不动点的位移从变焦相机测得的无人机相对待测结构的位移中减去，即可得到结构的绝对位移。

（2）通过室外钢框架模型试验验证了所提方法的有效性。采用 5 倍变焦的长焦相机拍摄钢框架模型的测点运动，采用广角相机拍摄两侧对称固定灯柱的运动，基于背景不动点理论计算测点的绝对位移，并以固定相机结果为参考值，评估所提方法的精度。结果表明，在室外 10 m 测距下，所提方法的 RMSE 误差为 0.6038 mm，可以实现毫米级位移测量精度。

（3）通过野外实际桥梁试验验证了所提方法的工程实用性。以长沙市洪山大桥为测试桥梁，将所提方法计算的跨中测点在车辆荷载作用下的竖向位移与固定相机的结果对比，RMSE 误差为 2.1828 mm，证明了所提方法的工程应用价值。

第5章 融合机器视觉与区间仿射算法的影响线实测

5.1 引言

影响线是桥梁结构状态评估的重要指标。传统影响线实测方法依赖车辆称重系统和接触式传感器，存在运营成本高、效率低、风险大、阻碍交通等问题。为实现“无需接触式传感”、“无需封闭交通”、“无需车辆称重系统”的智能桥梁检测，本章提出了一种融合机器视觉与区间仿射算法的桥梁结构影响线实测方法。首先基于机器视觉技术获取桥梁测点的位移响应；其次利用区间仿射算法结合车辆出厂信息求解影响区间解；然后采用支持向量机从影响线区间数据中识别真实影响线；最后通过野外实际桥梁试验验证该方法的有效性。

5.2 影响线识别原理及方法

在实际工程背景下，为了实现有效的桥梁结构识别，须探索一种能够快速实施、易于操作的轻量化智能监测技术。本章提出了一种融合机器视觉和区间仿射算法的桥梁影响线实测方法，该方法的框架如图 5.1 所示，具体包括三大模块。模块 1 是基于机器视觉技术获取桥梁测点的动态位移响应数据；模块 2 根据桥梁位移响应数据和轴重区间矩阵，利用区间仿射算法得到桥梁影响线的分布区间；模块 3 采用支持向量机从影响线区间数据中识别桥梁真实影响线的位置。

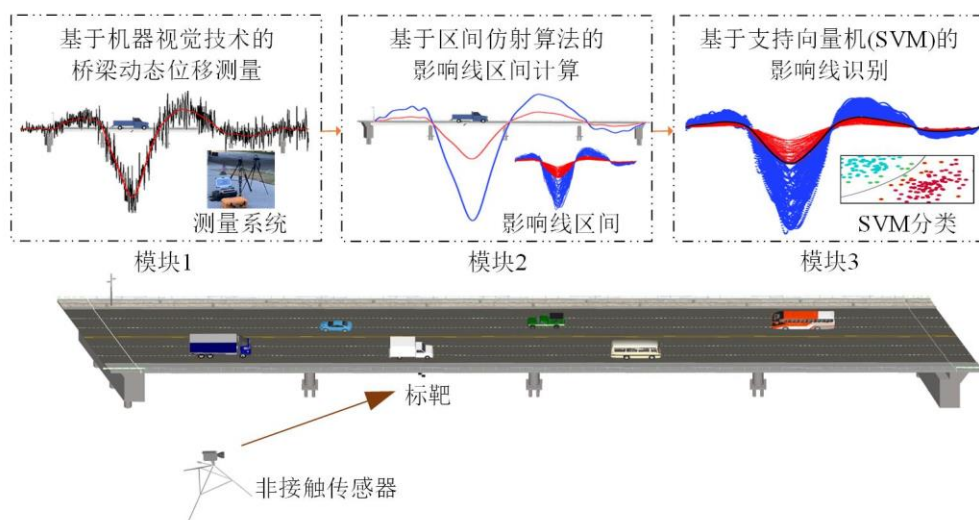


图 5.1 影响线实测方法框架

5.2.1 影响线识别模型

桥梁影响线是指单位集中荷载沿桥梁跨度方向移动时，引起结构某一截面的内力、位移或反力等的数值随单位载荷作用位置变化的曲线。在影响线推导分析

中，通常将车辆轮载作用位置等效为多个集中荷载，车致总响应近似等效为单个轴重荷载响应的线性叠加^[89]。因此，对于每个采样点 k ，车辆的总响应值 R_k^T 可以用轴重 W_i 和对应第 i 轴的桥梁影响系数 $L_{(k-C_i)}$ 表示^[112]：

$$R_k^T = \sum_{i=1}^N W_i L_{(k-C_i)} \quad (5.1)$$

$$C_i = \frac{D_i f}{v} \quad (5.2)$$

式中， N 为车辆轴数， C_i 为第 1 轴与第 i 轴的采样点差； D_i 为轴距； f 为采样频率； v 为车辆行驶速度。以试验采用的二轴车为例，图 5.2 给出了单位影响线的分解过程^[90]。

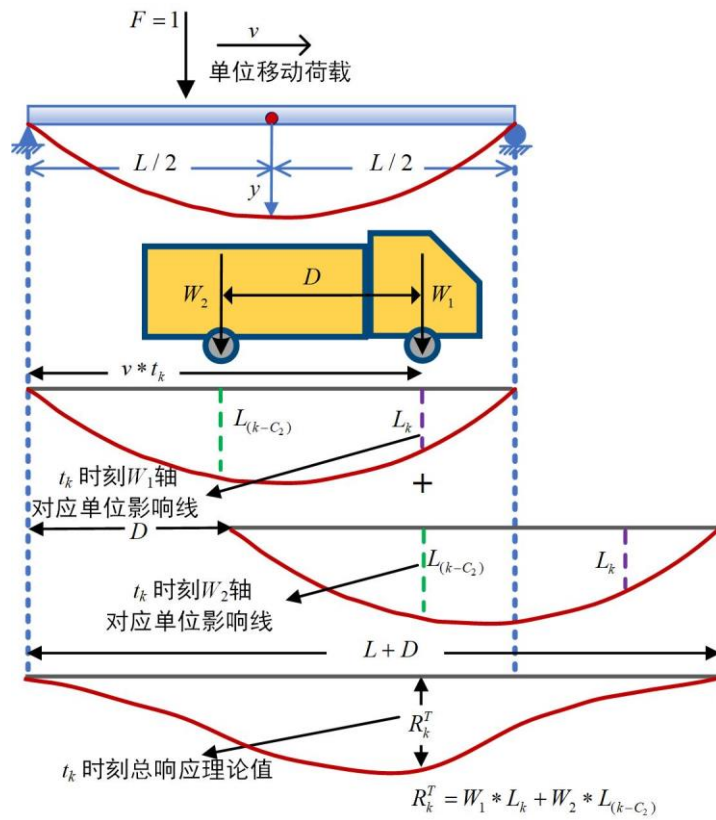


图 5.2 单位影响线分解

公式(5.1)可以改写为矩阵形式^[113]：

$$\mathbf{R}_{K,1} = \mathbf{W}_{K,K-C_N} \mathbf{L}_{K-C_N,1} \quad (5.3)$$

$$\begin{Bmatrix} R_1^T \\ R_2^T \\ \vdots \\ R_K^T \end{Bmatrix}_{K \times 1} = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & \cdots & W_2 & 0 & \cdots & W_N & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_1 & 0 & \cdots & W_2 & 0 & \cdots & W_N & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \ddots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & W_1 & 0 & \cdots & W_2 & 0 & \cdots & W_N \end{bmatrix}_{(K-C_N) \times K} \times \begin{Bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{K-C_N} \end{Bmatrix}_{(K-C_N) \times 1} \quad (5.4)$$

式中， $\mathbf{R}_{K,1}$ 表示在测点处采集的位移时程响应列向量； $\mathbf{W}_{K,K-C_N}$ 是包含车辆轴重、轴距、位置信息的大规模参数矩阵； $\mathbf{L}_{K-C_N,1}$ 代表桥梁影响系数组成的向量； K 为测

量采样点数。

故影响线可以通过式(5.5)求解：

$$\mathbf{L}_{K-C_N,1} = \mathbf{W}_{K,K-C_N}^{-1} \mathbf{R}_{K,1} \quad (5.5)$$

上述影响线求解方法可视为动力学第一类反问题。通常，结构的响应可以通过各类传感器获取（输出）；车辆轴重、轴距、速度等载荷信息需要对车辆预称重（输入）。然而，对正在运营的中小桥梁进行传感器的全面安装和车辆预称重需要封闭交通且成本较高。本章提出的影响线实测方法，采用机器视觉技术获取测点的位移时程响应（输出），根据车辆出厂信息提供的轴重区间矩阵结合区间仿射算法求解影响线的解区间（输入），最后通过 SVM 识别确定性影响线，可以在没有 WIM 系统的情况下实现桥梁影响线非接触式识别，适用于量大面广的中小桥梁结构识别。

5.2.2 基于机器视觉技术的桥梁结构动态位移测量（模块 1）

本章采用视频位移系统（VDS）^[114]，基于机器视觉技术测量桥梁跨中测点的动态位移。与接触式测量相比，该方法具有非接触、操作简单、能够长距离多点实时监测等优势，在结构动态位移测量中显现出较好的测量效果^[115]。位移求解算法采用数字图像相关技术，利用基于傅里叶变换的互相关（FTCC）^[116]算法计算整像素位移，采用反向组合的高斯-牛顿算法（IC-GN）^[117]计算亚像素位移，以下对其原理进行简要介绍。

（1）整像素位移计算：在获取结构感兴趣区域（ROI）的图像序列后，采用 FTCC 算法计算整像素位移，算法流程如图 5.3 所示。设参考子集为 $f_1(x, y)$ ，当前待匹配子集为 $f_2(x, y)$ ，两个子集尺寸相同，当参考子集仅产生 x, y 方向上的刚体位移 (u, v) 时，则其位移表达式为：

$$f_2(x, y) = f_1(x - u, y - v) \quad (5.6)$$

对式(5.6)进行二维傅里叶变换可以得到：

$$F_2(\varepsilon, \eta) = e^{-j2\pi(\varepsilon u + \eta v)} F_1(\varepsilon, \eta) \quad (5.7)$$

式中， F_1 和 F_2 分别为 f_1 和 f_2 的傅里叶变换， ε 与 η 分别为二维频谱函数的横、纵坐标； j 表示虚数单位。

根据傅里叶变换平移性质可知，傅里叶变换频谱仅在相位处发生改变，故只存在一个与位移 (u, v) 相关的相位差，且该相位差相当于两幅图像的互功率谱相位：

$$\frac{F_1(\varepsilon, \eta) F_2^*(\varepsilon, \eta)}{|F_1(\varepsilon, \eta) F_2^*(\varepsilon, \eta)|} = e^{j2\pi(\varepsilon u + \eta v)} \quad (5.8)$$

式中， $F_2^*(\varepsilon, \eta)$ 是 $F_2(\varepsilon, \eta)$ 的复共轭。对式(5.8)进行傅里叶逆变换得到脉冲函数，其在 (u, v) 处取得峰值，故通过峰值点的求取即可获得图像的初始整像素位移。

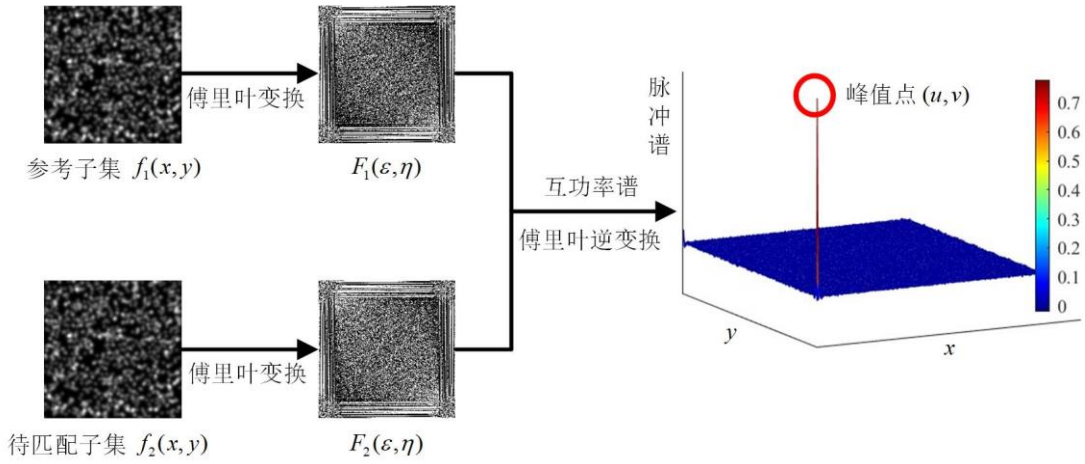


图 5.3 FTCC 算法流程

(2) 亚像素位移计算：采用 IC-GN 算法将 FTCC 算法获取的整像素位移作为迭代初值，选择零均值归一化误差平方和 (ZNSSD) 函数^[117]作为相关准则进行亚像素位移计算。ZNSSD 函数的表达式如下：

$$C_{\text{ZNSSD}} = \sum \left\{ \frac{[f(x,y) - f_m]}{\sqrt{\sum [f(x,y) - f_m]^2}} - \frac{[g(x',y') - g_m]}{\sqrt{\sum [g(x',y') - g_m]^2}} \right\}^2 \quad (5.9)$$

式中， $f(x,y)$ 和 $g(x',y')$ 分别为参考子集和待匹配子集的二维灰度函数； (x,y) 和 (x',y') 表示二维灰度函数的坐标； f_m 和 g_m 分别为 $f(x,y)$ 和 $g(x',y')$ 的均值。当 IC-GN 算法迭代至式(5.9)收敛于最小值时，即可获取图像的亚像素位移。通过 FTCC 和 IC-GN 算法，在视频流中选定桥梁跨中测点为 ROI 区域后，即可实现非接触式桥梁动态位移测量。

5.2.3 基于区间仿射算法的影响线区间计算（模块 2）

实际工程中，在无 WIM 系统的支持下，移动车辆的轴重、轴距、速度等参数依靠人工视觉观测，其各项参数特别是轴重具有不确定性，利用不确定的参数进行影响线的识别，其结果也将存在一定偏差。区间分析是一种对具有非概率分布的不确定参数建模的有效方法，目的是通过区间计算得到系统响应的边界^[118]。由于对多项不确定参数同时进行区间分析较为复杂，本章仅选择轴重作为不确定性参数，将车辆整备质量和最大总质量作为轴重区间的上下边界，用轴重区间矩阵代替确定性轴重参数进行影响线计算^[119,120]。由于实际车重大概率包含在此区间内，每种载重工况均可通过区间运算获得一组影响线的区间数据，多工况的区间数据形成具有上下边界的影响线解区间，便可以通过机器学习分类算法如 SVM 识别确定性影响线。由于区间变量在矩阵运算中极易产生病态结果，故本章采用基于纽曼展开的仿射求逆算法抑制区间扩张问题以获得更加精确的解区间^[121]，以二轴车为例，理论流程如下：

(1) 将确定性轴重参数矩阵转化为轴重区间矩阵 \mathbf{W}^I :

$$\mathbf{W}^I = \begin{bmatrix} [\underline{w}_1, \overline{w}_1] & 0 & \cdots & [\underline{w}_2, \overline{w}_2] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & [\underline{w}_1, \overline{w}_1] & 0 & \cdots & [\underline{w}_2, \overline{w}_2] & 0 & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & [\underline{w}_1, \overline{w}_1] & 0 & \cdots & [\underline{w}_2, \overline{w}_2] \end{bmatrix}^T \quad (5.10)$$

式中, $[\underline{w}_1, \overline{w}_1]$ 和 $[\underline{w}_2, \overline{w}_2]$ 分别表示二轴车第 1、2 轴的轴重取值范围; \underline{w}_i 和 \overline{w}_i 分别为轴重极大、极小边界值 $i=(1,2)$ 。

(2) 将轴重区间变量 w_i^I 转化为仿射型变量:

$$\begin{cases} w_1^I = [\underline{w}_1, \overline{w}_1] = x_0 + x_1 \times \varepsilon_1, \varepsilon_1 \in [-1, 1] \\ w_2^I = [\underline{w}_2, \overline{w}_2] = y_0 + y_1 \times \varepsilon_2, \varepsilon_2 \in [-1, 1] \end{cases} \quad (5.11)$$

式中, x_0, y_0 为区间中值, x_1, y_1 为区间半径, ε_i 为表示变量相关性强弱的噪声元, 值域为 $[-1, 1]$ 。于是影响线区间向量 \mathbf{L}^I 可以根据式(5.12)求得:

$$\mathbf{L}^I = [\mathbf{W}_0^{-1} \mathbf{W}^I]^{-1} \mathbf{W}_0^{-1} \mathbf{R} = (\mathbf{I} + \mathbf{W}_0^{-1} \mathbf{W}_1 \varepsilon_1 + \mathbf{W}_0^{-1} \mathbf{W}_2 \varepsilon_2)^{-1} \mathbf{W}_0^{-1} \mathbf{R} \quad (5.12)$$

式中, \mathbf{W}_0 为区间中值矩阵; $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$ 为区间半径矩阵; \mathbf{R} 表示由车辆荷载引起的结构动态总响应矩阵。

(3) 求解影响线区间向量 \mathbf{L}^I :

令 $\mathbf{X}_1 = \mathbf{W}_0^{-1} \mathbf{W}_1, \mathbf{X}_2 = \mathbf{W}_0^{-1} \mathbf{W}_2, \mathbf{A}^I = (\mathbf{I} + \mathbf{X}_1 \varepsilon_1 + \mathbf{X}_2 \varepsilon_2)^{-1}$, 对 \mathbf{A}^I 应用一阶纽曼展开, 得到其近似值域:

$$\mathbf{A}^I \approx \mathbf{I} - (\mathbf{X}_1 \varepsilon_1 + \mathbf{X}_2 \varepsilon_2) + (\mathbf{X}_1 \varepsilon_1 + \mathbf{X}_2 \varepsilon_2)^2 (\mathbf{I} + \mathbf{X}_1 \varepsilon_1 + \mathbf{X}_2 \varepsilon_2)^{-1} \quad (5.13)$$

引入新的噪声元 $\varepsilon_e \in [-1, 1]$, 当 $\varepsilon_e = \pm 1$ 时, 可以取到 \mathbf{A}^I 上下边界值:

$$\mathbf{A}^I \subseteq \mathbf{I} - (|\mathbf{X}_1| + |\mathbf{X}_2|) \varepsilon_e + (|\mathbf{X}_1| + |\mathbf{X}_2|)^2 \varepsilon_e^2 [\mathbf{I} + (|\mathbf{X}_1| + |\mathbf{X}_2|) \varepsilon_e]^{-1} = [\underline{\mathbf{A}}, \overline{\mathbf{A}}] \quad (5.14)$$

故影响线的解区间向量 \mathbf{L}^I 为:

$$\mathbf{L}^I \subseteq \mathbf{A}^I \mathbf{W}_0^{-1} \mathbf{R} = [\underline{\mathbf{L}}, \overline{\mathbf{L}}] \quad (5.15)$$

因此, 如果轴重区间包含真实轴重, 得到的影响线区间总能包含基准影响线。

5.2.4 基于支持向量机的影响线识别 (模块 3)

通过区间仿射算法获取多工况的影响线区间数据后, 将其离散为二维平面上的数据散点, 最终上、下两类边界数据在基准曲线附近收敛, 继而可以用机器学习分类技术从中提取真实影响线的位置信息。本章采用擅长二元分类任务的 SVM 对影响线区间的边界数据进行分类^[120]。由于影响线区间数据在平面上呈非线性

特征，故引入非线性变换核技巧，选择高斯核作为非线性变换的核函数并建立惩罚机制处理影响线边界交叉现象。

定义输入 SVM 分类器的样本数据为带有标签的向量 $\vec{x}_i \in \mathbf{R}^n$ ，一般在二元分类问题中，当对应向量属于正信息时，赋予样本标签值“+1”；反之赋予标签值“-1”。在计算过程中，给定一个数据集 $\{(\vec{x}_i, y_i), \vec{x}_i \in \mathbf{R}^n, y_i \in \{-1, +1\}, i=1, 2, \dots, n\}$ ，其中 (\vec{x}_i, y_i) 表示被标记的训练样本。设 $\phi(\mathbf{x}_i)$ 为将输入数据映射到特征空间的非线性函数，则约束不等式可表示为：

$$y_i(\mathbf{w} \cdot \phi(\mathbf{x}_i) + b) \geq 1 - \xi_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5.16)$$

式中，法向量 \mathbf{w} 和截距 b 共同决定特征空间分离超平面， ξ_i 表示允许错误分类的松弛因子。则二元分类与原始优化问题可表述为：

$$\min_{\mathbf{w}, b, \xi} \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum \xi_i \rightarrow s.t. \begin{cases} y_i(\mathbf{w} \cdot \phi(\mathbf{x}_i) + b) \geq 1 - \xi_i \\ \xi_i \geq 0 \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5.17)$$

式中， C 是惩罚因子，控制错分类的惩罚程度。通过引入 $\alpha_i \geq 0$ 和 $\alpha_j \geq 0$ 的拉格朗日乘子，最终可将原优化问题转化为：

$$\min_{\alpha} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \phi(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \rightarrow s.t. \begin{cases} \sum \alpha_i y_i = 0 \\ 0 \leq \alpha_i \leq C \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5.18)$$

则相应的决策函数可以表示为：

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i \kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + b^* \right) \quad (5.19)$$

$$\kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp \left(-\frac{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (5.20)$$

式中， κ 表示高斯径向基核函数； σ 表示为高斯径向基函数宽度。

定义高斯核参数 $g = 1/\sigma^2$ ，则 SVM 的泛化性能取决于惩罚因子 C 和高斯核参数 g 的设置，通常通过基于交叉验证的网格搜索方法来确定两者的最优组合。分别将影响线上下界数据赋予标签值“+1”和“-1”，通过调节高斯核函数的参数和惩罚因子的范围以获取分类准确度最高的模型作为最优 SVM 模型，如图 5.4 所示。SVM 算法的主要应用流程如下：

- (1) 输入影响线区间数据，将其离散为二维平面散点 (\mathbf{x}_i, y_i) ， $i=1, 2, \dots, n$ ；
- (2) 确定高斯核参数和惩罚因子范围；
- (3) 采用序列最小优化 (SMO) [122] 算法进行二次优化；
- (4) 选取分类准确率最高的模型作为最终训练的支持向量机；
- (5) 根据分类结果，提取边界坐标形成影响线近似数值解。

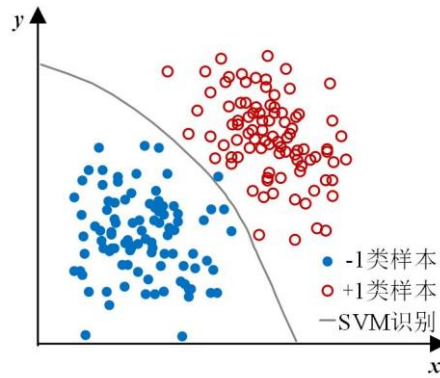


图 5.4 支持向量机二分类

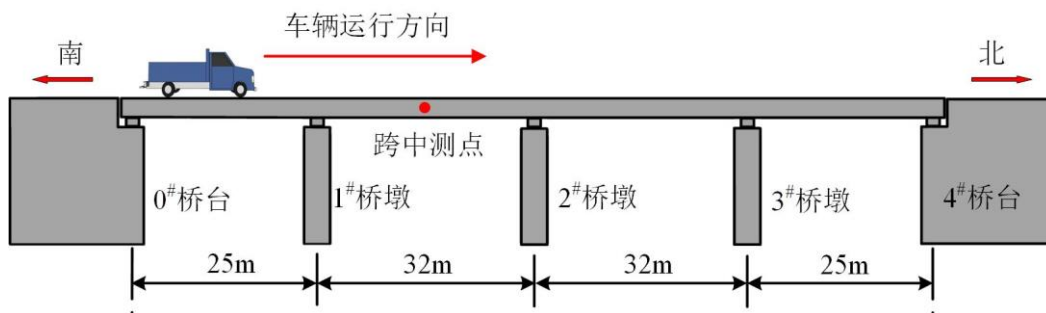
5.3 野外试验

5.3.1 试验概况

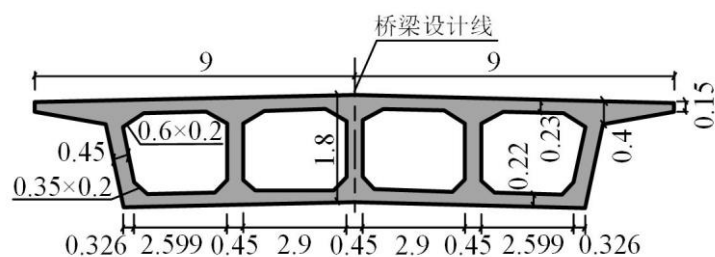
为了验证上述提出的融合机器视觉和区间仿射算法的桥梁影响线实测方法的有效性，对长沙市桃花岭景区东入口联通桥进行了现场试验。该桥为四跨连续箱梁桥，总跨度为 114 m，跨径组合为 25 m+32 m+32 m+25 m。该桥具有双车道，桥身采用盆式橡胶支座、现浇混凝土箱梁、钢筋混凝土桥墩和桩基础，桥梁现场及其参数示意图如图 5.5 所示。



a) 桥梁现场



b) 桥梁立面参数



c) 箱梁断面示意图 (单位/m)

图 5.5 桥梁示意图

测点布置在桥梁第二跨跨中，采用 $250 \times 250 \text{ mm}$ 的二维码进行标靶。通过布置在桥梁东侧的动态位移测量系统采集测点的竖向位移，如图 5.6 所示。为降低光照变化对系统测试精度的影响，每隔一小时对相机进行重新标定。根据 Shannon 采样定理^[123]，为了不失真地恢复模拟信号，该系统采样频率设置为 30 Hz ，测量精度为 0.001 mm ，配套相机分辨率为 $1920 \times 1200 \text{ pixels}$ ，焦距为 $100 \sim 400 \text{ mm}$ 。

为了验证本章算法，采用的标定车辆如图 5.7 所示。根据车辆的出厂信息，已知车辆轴距为 3.36 m ，整备质量为 3350 kg ，最大总质量为 9995 kg ，前后轴的轴荷分配分别为 0.36 、 0.64 （假设重量变化下，前后轴的轴荷分配不变）。为使真实轴重在轴重区间内近似均匀满布，在该轴重区间内对车辆进行了 25 次加载，每种载重工况下，车辆分别以 10 km/h 、 20 km/h 、 30 km/h 的速度从桥的南端行驶至北端，共进行 75 次跑车试验。



图 5.6 动态位移测量系统



图 5.7 标定车辆

5.3.2 测试结果分析

(1) 基于机器视觉技术的桥梁位移响应获取：选择标靶区域为 ROI 区域，采用 VDS 系统基于 5.2.2 节的位移测量算法可以计算得到桥梁位移响应的原始数据。由于影响线的识别只与静态位移响应有关，故需剥离原始数据中的动力干扰。本章采用快速傅里叶变换 (FFT) 低通滤波器^[124,125]消除原始位移时程响应中的动力干扰^[18]，将桥的固有频率 5.18 Hz 作为截止频率，低于截止频率的响应可视为

桥梁的静态位移响应^[113]。以第 13 次加载工况 (M13) 为例, 当车辆以 30 km/h 的速度通过该桥时, 跨中测点的原始数据与滤波后的静态位移数据如图 5.8 所示。

将滤波过程应用于所有跑车试验, 根据车辆位置与有效响应时程的对应关系进行时空坐标转换, 将有效时程响应转换为与位置有关的桥梁响应, 如图 5.9 所示, 横轴表示车辆沿桥长移动的距离。经数据预处理后的桥梁跨中测点的位移响应即可用于影响线的识别。

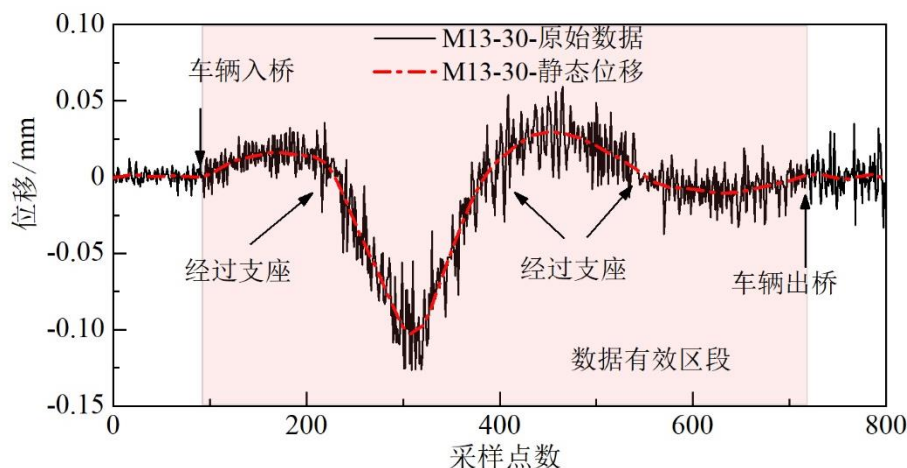


图 5.8 M13-30 静态位移响应

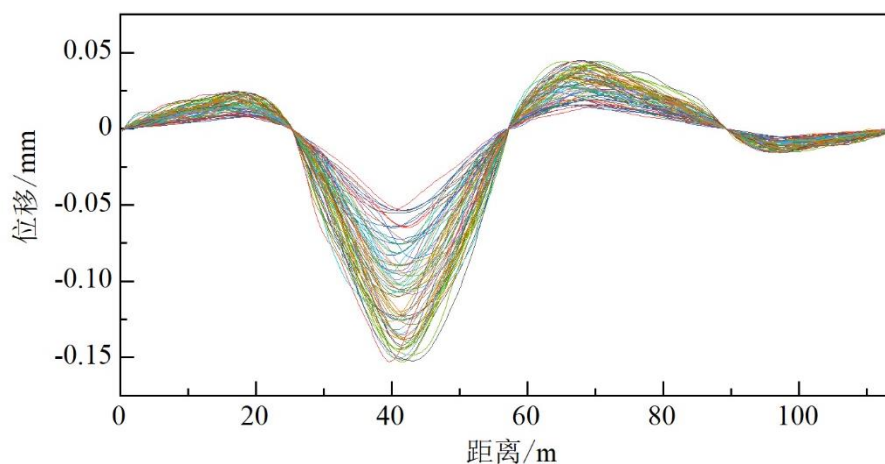


图 5.9 桥梁跨中测点位移响应

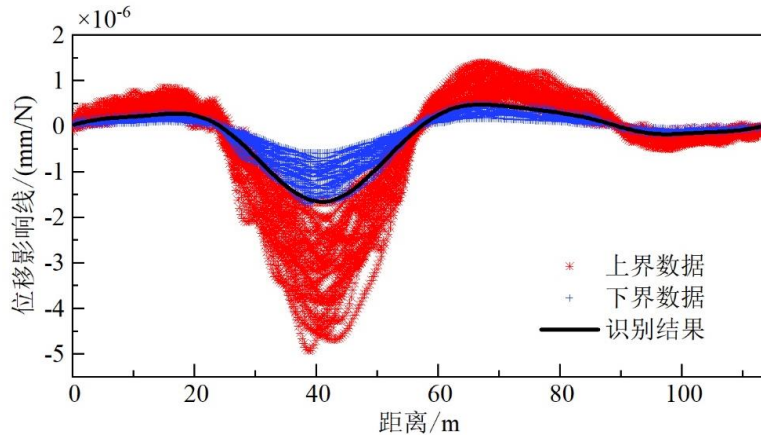
(2) 基于区间仿射算法及 SVM 的影响线识别: 为探究车速对影响线识别结果的影响, 按照车速将 75 组跑车试验分为 10 km/h (25 组)、20 km/h (25 组)、30 km/h (25 组) 及混合工况 (75 组) 四类工况, 其中混合工况为包含 10 km/h、20 km/h、30 km/h 三种速度的所有跑车试验的工况混合。计算时各项参数取值如表 5.1 所示, 其中, D 为车辆轴距; m 为车辆总质量区间; w_1 、 w_2 分别为车辆前后轴重区间。

在轴重区间 w_1 、 w_2 内对获取的跨中测点位移响应进行区间仿射计算, 得到影响线区间上下界数据, 采用 SVM 识别各工况下的影响线如图 5.10 所示。由图 5.10 可以发现, 各工况下的影响线区间上下界均在真实影响线附近收敛, 利用

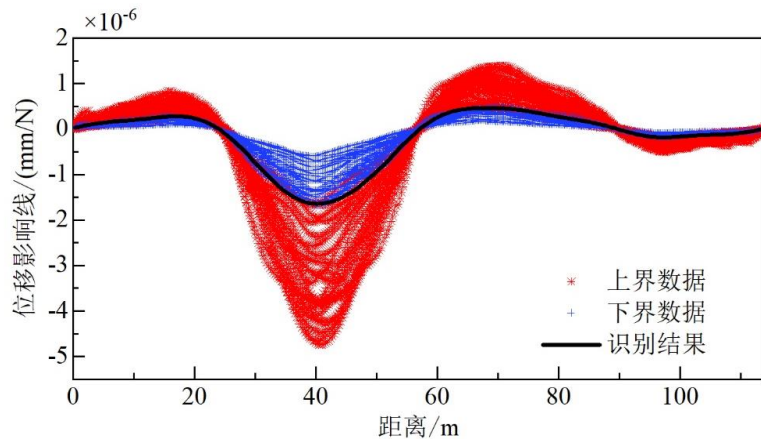
SVM 能有效识别桥梁影响线，且较完整地保留了其形状趋势。

表 5.1 计算参数

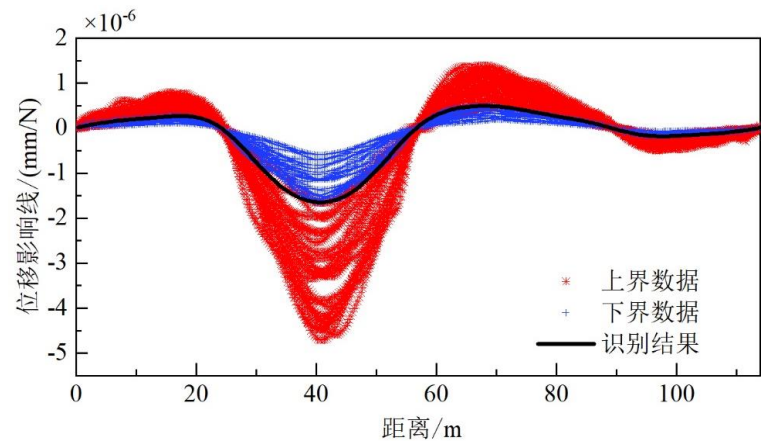
参数	D/m	m/kg	w_1/kg	w_2/kg
取值	3.36	[3350,9995]	[1205,3595]	[2145,6400]



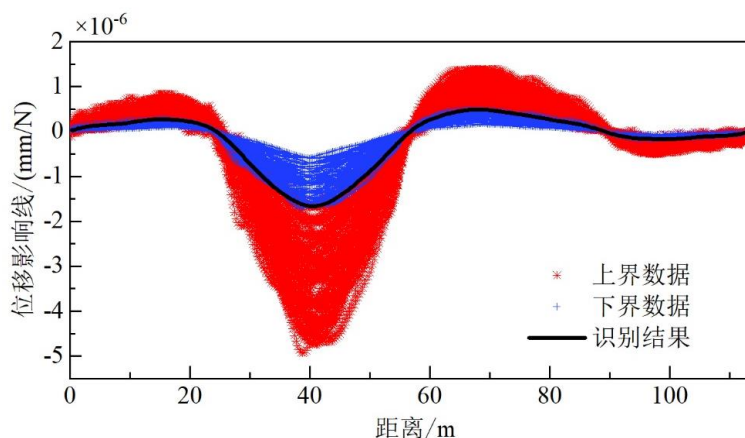
a) 10 km/h



b) 20 km/h



c) 30 km/h



d) 混合工况

图 5.10 各工况影响线识别结果

(3) 影响线实测精度验证：为验证本章提出的桥梁影响线实测方法的精度，根据公式(5.5)采用单位影响线叠加法计算了 75 次跑车试验的影响线均值作为静态基准影响线^[120,126]，如图 5.11 所示。将各工况下的 SVM 识别结果与静态基准影响线进行对比，如图 5.12 所示。

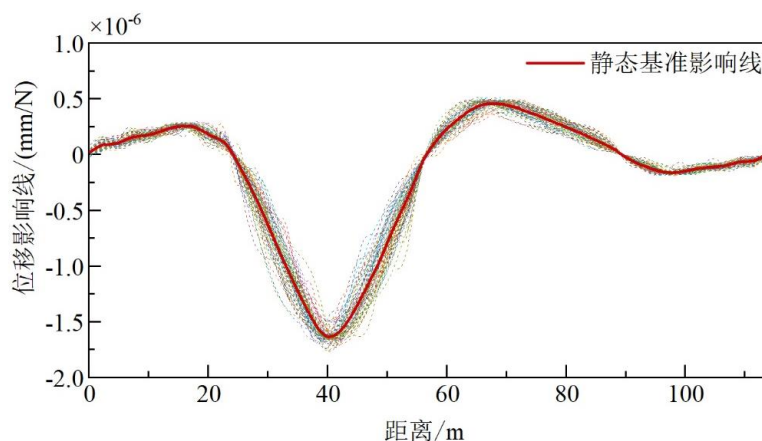


图 5.11 桥梁跨中测点静态基准影响线

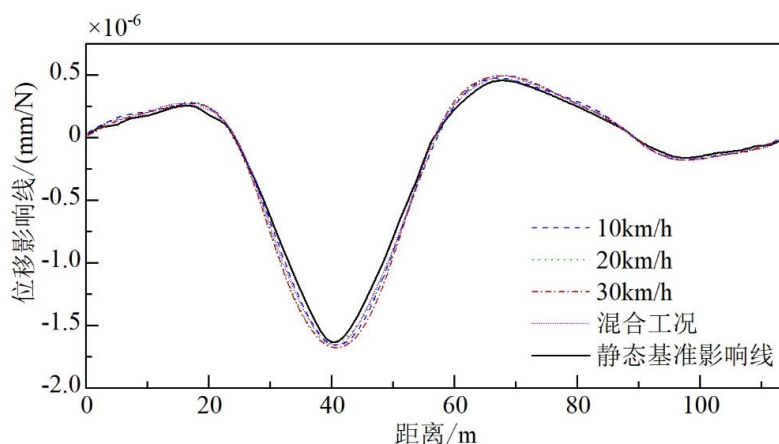


图 5.12 影响线识别结果对比

经计算，混合工况下影响线的识别误差为 8.48 %；车速 10 km/h、20 km/h、30 km/h 下影响线识别误差分别为 9.22 %、10.23 %、12.38 %，总体稳定性良好。由图 5.12 可以发现：1) SVM 识别结果较静态基准影响线数值偏大。一是因为真

实的轴重在轴重区间的分布未能达到足够密度影响了真实影响线的识别；二是现场实测过程中不可避免地受到外界噪声干扰，使数据的离散程度增大，影响了 SVM 对区间边界的分类结果。2) 影响线的识别误差随车速的增大而增大。主要原因是车速的增大使测点动力响应中的动力放大效应逐渐增大，影响线出现更大的波动性，造成 SVM 识别结果相对基准曲线逐渐偏离。3) 混合工况下，影响线的识别误差最小。本章的野外实际桥梁试验为验证性试验，测试的样本数量受限于时间和经费等因素，在实际工程中，可以通过增加训练样本的数量来提高影响线的识别精度。

5.4 本章小结

本章提出了一种融合机器视觉和区间仿射算法的桥梁影响线实测方法。该方法具有非接触、高精度、稳定性好和经济灵活等优点，适用于对量大面广的中小型桥梁进行结构状态评估，得到的主要结论如下：

(1) 提出了一种融合机器视觉和区间仿射算法的桥梁影响线实测方法框架。在无 WIM 系统的支持下，首先利用机器视觉技术获取桥梁测点的动态位移响应，然后基于区间仿射算法结合车辆出厂信息提供的轴重区间矩阵计算影响线区间数据；最后采用 SVM 从多工况的影响线区间数据中识别确定性影响线。

(2) 通过野外实际桥梁跑车试验评估了所提方法的有效性。在混合工况下，SVM 识别的结果较好的保留了影响线的趋势，与静态基准影响线相比，识别误差为 8.48%，识别效果较好。

(3) 通过设置不同速度工况，验证了所提方法的稳定性。当车速为 10 km/h、20 km/h、30 km/h 时，影响线的识别误差分别为 9.22%、10.23%、12.38%。随着车速的增加，影响线的识别精度逐渐降低。

结论与展望

结论

桥梁安全事关人民生命财产安全和社会经济的可持续发展。近年来,我国桥梁建设成果显著,桥梁数量和规模在世界上占据主导地位,迈入桥梁建设强国。然而随着现代交通技术的不断发展,桥梁负载压力也在不断增加,加上桥梁本身的施工设计缺陷和自然灾害等因素的威胁,桥梁服役期内的安全运营面临挑战。传统的桥梁检测依靠人工巡检和接触式传感器的安装,成本高、效率低、阻碍交通且危险性较高,因此研究一种智能化和轻量化的桥梁快速检测方法具有重要意义。本文基于该背景提出了基于机器视觉技术的结构非接触式动态位移和位移影响线测量方法,该方法使用无人机和固定相机作为非接触式传感器,具有成本低、效率高、非接触、精度高、无需封闭交通等优势,是实现“智能桥梁”和“智慧交通”的新思路。主要的研究成果如下:

(1)提出了一种基于单目无人机的结构动态位移测量方法。该方法结合数字图像相关算法和背景不动点理论补偿无人机平面内的位移漂移;基于 ArUco 编码标靶识别逐帧更新测点和背景不动点的尺度因子补偿无人机平面外的位移漂移;基于对称背景不动点修正空间几何误差,从而得到结构的绝对位移。通过实验室钢框架模型试验验证了所提方法的精度和稳定性,在 1.5 m、3 m 和 5 m 的测距下,所提方法计算结果与激光位移计相比, RMSE 误差分别为 0.7777 mm、0.7439 mm 和 1.2538 mm。结果表明,基于单目无人机的结构动态位移测量精度不仅与距离引起的位移算法精度有关,还与空间几何误差有关,在工程实践中应根据测点和背景不动点的位置关系合理选择测距,以提高测量精度。

(2)提出了一种基于无人机载双相机的结构动态位移测量方法。该方法使用大疆 MRTK300 无人机搭载同轴双相机禅思 H20T,其中广角相机捕捉背景不动点的运动信息,变焦相机捕捉待测结构的运动信息,成功克服了单目无人机视场受限的问题。由于双相机的标定结果证明了两个镜头近似平行排列,故直接将广角相机测量结果从长焦相机中减去便可以直接得到结构的绝对位移。通过室外钢框架模型试验验证了所提方法的有效性,10 m 测距下所提方法的 RMSE 误差为 0.6038 mm,可以实现毫米级位移测量;通过野外实际桥梁试验验证了所提方法的工程实用性,在长沙市洪山大桥的现场测试中求得所提方法的 RMSE 误差为 2.1828 mm,能够满足工程测量需求,具有工程应用前景。

(3)提出了一种融合机器视觉和区间仿射算法的桥梁影响线实测方法。该方法首先基于机器视觉技术采用固定相机获取多工况的桥梁测点动态位移响应;其次,根据车辆出厂信息建立车辆轴重区间矩阵并通过区间仿射算法计算多工况的

影响线区间；最后，采用支持向量机（SVM）从影响线区间中识别桥梁真实影响线。选择长沙市桃花岭景区东入口联通桥作为测试桥梁验证了所提方法的精度和稳定性。通过控制标定车辆的载重和行驶速度获取多工况的位移响应数据以评估该方法的性能。结果表明：该方法能够有效地从影响线区间中识别桥梁真实影响线，混合工况下影响线的识别误差为 8.48 %；当车速为 10 km/h、20 km/h、30 km/h 时，影响线的识别误差分别为 9.22 %、10.23 %、12.38 %，随着车速的增加，影响线的识别精度逐渐降低。

展望

本文为结构非接触式动态位移和位移影响线的测量提供了新思路，并在实验室和野外试验中验证了所提方法的应用效果，具有一定的工程应用前景。然而，受制于工程实际和设备局限，仍存在以下问题有待改进和完善：

（1）在单目无人机测量结构动态位移方面：所提方法只能用于测量结构的面内位移，如果想要测量结构的三维位移还需要添加其他标记参考；单目相机视场范围有限，若想同时观测背景不动点和测点可能需要远距离测量，一方面影响了位移算法的精度，另一方面也不利于 ArUco 标靶的识别；位移测量的精度依赖于对称背景不动点的选择，故对背景场景要求较高，可能会限制一部分工程应用场景。未来可以针对上述问题进行算法的改进以满足工程实际需求。

（2）在无人机载双相机测量结构动态位移方面：由于禅思 H20T 相机的广角和变焦镜头是平行排列的，为满足测量精度需求，对于特大跨桥梁可能仍无法在广角相机中观测到对称背景不动点，今后的工作中可以尝试使用两个可以自由转动的变焦相机分别观测测点和背景不动点以剔除无人机基点运动。

（3）在基于机器视觉和区间仿射算法的桥梁影响线测量方面：测试的样本数量受制于时间和经费等因素，在今后的工作中可以通过增加样本数量提高影响线识别精度；仅研究了单车通行作用下桥梁影响线的实测结果，当考虑随机车流的复杂工况时，一方面，可以通过车辆数据库的建立获取多车型条件下的轴重区间矩阵，另一方面，采用盲源分离算法可以有效地分离多车道桥梁混合响应。因此，建议今后的相关研究应侧重于基于随机车流的桥梁影响线实测。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html
- [2] 张方, 张开全, 邓捷超等. 桥梁评估与加固2020年度研究进展. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(S1): 152-166
- [3] 彭卫兵, 沈佳栋, 唐翔等. 近期典型桥梁事故回顾、分析与启示. 中国公路学报, 2019, 32(12): 132-144
- [4] 吉伯海, 傅中秋. 近年国内桥梁倒塌事故原因分析. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 495-498
- [5] 叶肖伟, 董传智. 基于计算机视觉的结构位移监测综述. 中国公路学报, 2019, 32(11): 21-39
- [6] Dong C Z, Celik O, Catbas F N. Marker-free monitoring of the grandstand structures and modal identification using computer vision methods. Structural Health Monitoring, 2018, 18(5-6): 147592171880689
- [7] Gindy M, Nassif H, Velde J. Bridge displacement estimates from measured acceleration records. Transportation Research Record, 2007(2028): 136-145
- [8] Ye X W, Ni Y Q, Wai T T, et al. A vision-based system for dynamic displacement measurement of long-span bridges: Algorithm and verification. Smart Structures and Systems, 2013, 12(3-4): 363-379
- [9] Lou P, Nassif H, Su D. Impact of heavy freight railcar on the remaining fatigue life of centenarian railway bridges. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(11): 04017097
- [10] 吴江. 永久性散射体雷达干涉测量技术在城市地表形变监测中的应用. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(12): 208-210
- [11] Xu L, Guo J J, Jiang J J. Time-frequency analysis of a suspension bridge based on GPS. Journal of Sound and Vibration, 2002, 254(1): 105-116
- [12] Yi T H, Li H N, Gu A M. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures. Structural Control and Health Monitoring, 2013, 20(5): 649-670
- [13] Xu Y, Brownjohn J M W. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8(1): 91-110
- [14] Feng D, Feng M Q, Ozer E, et al. A vision-based sensor for noncontact structural

- displacement measurement. *Sensors*, 2015, 15(7): 1655716575
- [15] Feng D, Feng M Q. Identification of structural stiffness and excitation forces in time domain using noncontact vision-based displacement measurement. *Journal of Sound Vibration*, 2017, 406: 15-28
- [16] Khuc T, Catbas F N. Computer vision-based displacement and vibration monitoring without using physical target on structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 13(4): 1-12
- [17] Lee J, Cho S, Shinozuka M, et al. Evaluation of bridge load carrying capacity based on dynamic displacement measurement using real-time image processing techniques. *Steel Structures*, 2006, 6: 377-385
- [18] Khuc T, Catbas F N. Structural identification using computer vision-based bridge health monitoring. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(2): 04017202
- [19] Chen J G, Adams T M, Sun H, et al. Camera-based vibration measurement of the World War I Memorial Bridge in Portsmouth, New Hampshire. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(11): 04018207
- [20] Feng D, Scarangelo T, Feng M Q, et al. Cable tension force estimate using novel noncontact vision-based sensor. *Measurement*, 2017, 99: 44-52
- [21] Ojio T, Carey C H, O'Brien E J, et al. Contactless bridge weigh-in-motion. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(7): 04016032
- [22] Stephen G A, Brownjohn J M W, Taylor C A. Measurements of static and dynamic displacement from visual monitoring of the Humber Bridge. *Engineering Structures*, 1993, 15(3): 197-208
- [23] Fukuda Y, Feng M Q, Narita Y, et al. Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 13(12): 1928-1931
- [24] 陈昌川, 李奎, 乔飞等. 基于图像处理的建筑物振动位移测量算法. *电子与信息学报*, 2020, 42(10): 2516-2523
- [25] 周云, 程依婷. 基于数字图像相关理论的非接触式结构位移测量方法. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(05): 1-9
- [26] 王鹏鹏, 郭晓霞, 桑勇等. 基于数字图像相关技术的砂土全场变形测量及其DEM数值模拟. *工程力学*, 2020, 37(01): 239-247
- [27] Siegmann P, Felipe-Sesé L, Díaz F A. An alternative approach for improving DIC by using out-of-plane displacement information. *Optics and Lasers in*

- Engineering, 2020, 128: 105996
- [28] 刘纲, 李孟珠, 蒋伟等. 古建筑彩绘梁整像素位移自适应搜索解算方法. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(11): 106-113
- [29] Zhang D, Guo J, Lei X, et al. A high-speed vision-based sensor for dynamic vibration analysis using fast motion extraction algorithms. *Sensors*, 2016, 16(4): 572
- [30] 孙伟, 何小元. 数字图像相关方法在土木测试领域中的实验研究. 南京航空航天大学学报, 2009(02): 271-275
- [31] 龚纯健. 基于DIC 的桥梁运行模态分析. 广东工业大学, 2020
- [32] Xiu C, Pan X. Tracking algorithm based on the improved template matching // 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Chongqing, China: IEEE, 2017, 483-486
- [33] 张彩珍, 张云霞, 陈永刚等. 基于五帧差分和模板匹配的运动目标检测识别. 激光与红外, 2018, 48(12): 1554-1560
- [34] Yan Z G, Liang W G, Lv H D. A target tracking algorithm based on improved Camshift and UKF. *Journal of Software Engineering and Applications*, 2014, 7(13): 1065-1073
- [35] Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20: 062001
- [36] Foroosh H, Zerubia J B, Berthod M. Extension of phase correlation to subpixel registration. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(3): 188-199
- [37] Pan B, Xie H M, Xu B Q, et al. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(6): 1615-1621
- [38] Berenstein C A, Kanal L N, Lavin D, et al. A geometric approach to subpixel registration accuracy. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1987, 40(3): 334-360
- [39] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector // IEEE. Proceedings of the Alvey Vision Conference, New York: IEEE, 1998: 1-6
- [40] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110
- [41] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF). *Computer*

- Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359
- [42] Rosten E. Machine learning for high-speed corner detection // Machine learning for high-speed corner detection. Graz, Austria: ECCV, 2006: 430-443
- [43] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // 2011 International Conference on Computer Vision. Barcelona: ICCV, 2011: 2564-2571
- [44] OpenCV, Feature matching + homography to find objects. 2019-01-23. https://docs.opencv.org/master/d1/de0/tutorial_py_feature_homography.html
- [45] Song Y Z, Bowen C R, Kim A H, et al. Virtual visual sensors and their application in structural health monitoring. Structural Health Monitoring-An International Journal, 2014, 13: 251-264
- [46] Khuc T, Catbas F N. Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(1): 18-52
- [47] Hu Q, He S, Wang S, et al. A high-speed target-free vision-based sensor for bus rapid transit viaduct vibration measurements using CMT and ORB Algorithms. Sensors, 2017, 17(6): 1305-1317
- [48] Szeliskir. Computer vision: Algorithms and applications. London: Springer, 2011.
- [49] Tomasi C, Kanade T. Detection and tracking of point features. International Journal of Computer Vison, 1991, 9: 137-154
- [50] Fleet D J, Jepson A D. Computation of component image velocity from local phase information. International Journal of Computer Vison, 1990, 5: 77-104
- [51] Lucas B D. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proc. DARPA Image Understanding Workshop, 1981, 1-11
- [52] 夏婷, 景星烁, 邹卫军. 动态背景下基于金字塔LK光流的运动目标检测. 导航与控制, 2018, 17(01): 93-98
- [53] Yoon H, Elanwar H, Choi H, et al. Target-free approach for vision-based structural system identification using consumergrade cameras. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(1): 1405-1416
- [54] 周颖, 张立迅, 刘彤等. 基于计算机视觉的结构系统识别. 土木工程学报, 2018, 51(11): 17-23
- [55] Khaloo A, Lattanzi D. Pixel-wise structural motion tacking from rectified repurposed videos. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(11): 1-

15

- [56] Chen J G, Wadhwa N, Cha Y J, et al. Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 345: 58-71
- [57] Lu W, Cui Y, Teng J. Structural displacement and strain monitoring based on the edge detection operator. *Advances in Structural Engineering*, 2017, 20(2): 191-201
- [58] Wang Q, Zhang M, Xing J, et al. Do not lose the details: Reinforced representation learning for high performance visual tracking // *IJCAI. Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Bologna: ICAI, 2018: 985991
- [59] Wang Q, Zhang L, Bertinetto L, et al. Fast online object tracking and segmentation: A unifying approach. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, 1912: 5050
- [60] Li B, Wu W, Wang Q, et al. SiamRPN++: Evolution of siamese visual tracking with very deep networks. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, 1812: 11703
- [61] Kristan M, Leonardis A, Matas J, et al. The sixth visual object tracking VOT2018 challenge results // *ECCV. Proceedings of the VOT2018 Workshop*. Amsterdam: ECCV, 2018: 353
- [62] Feng D, Feng M Q. Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 88(2017): 199-211
- [63] Yu S, Xu Z, Su Z, et al. Two flexible vision based methods for remote deflection monitoring of a long span bridge. *Measurement*, 2021, 181: 109658
- [64] Xu Y, Zhang J, Brownjohn J. An accurate and distraction free vision based structural displacement measurement method integrating Siamese network based tracker and correlation based template matching. *Measurement*, 2021, 179: 109506
- [65] Wu T, Tang L, Du P, et al. Non-contact measurement method of beam vibration with laser stripe tracking based on tilt photography. *Measurement*, 2022, 187: 110314
- [66] Du W K, Lei D, Hang Z Q, et al. Short-distance and long-distance bridge

- displacement measurement based on template matching and feature detection methods. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2023, 13: 343-360
- [67] Yoon H, Shin J, Spencer B F. Structural displacement measurement using an unmanned aerial system. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018, 33(3): 183-192
- [68] Moreu F, Taha M. Railroad bridge inspections for maintenance and replacement prioritization using unmanned aerial vehicles (UAVs) with laser scanning capabilities. *Transportation Research Board Rail Safety Innovations Deserving Exploratory Analysis (IDEA) Program*, National Research Council, 2018
- [69] Hoskere V, Park J W, Yoon H, et al. Vision-based modal survey of civil infrastructure using unmanned aerial vehicles. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(7): 04019062
- [70] Khuc T, Nguyen T A, Dao H, et al. Swaying displacement measurement for structural monitoring using computer vision and an unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 2020, 159: 107769
- [71] Chen C, Liang Q, Zhong W, et al. Homography-based measurement of bridge vibration using UAV and DIC method. *Measurement*, 2021, 170: 108683
- [72] Perry B J, Guo Y. A portable three-component displacement measurement technique using an unmanned aerial vehicle (UAV) and computer vision: A proof of concept. *Measurement*, 2021, 176: 109222
- [73] Ribeiro D, Santos R, Cabral R, et al. Non-contact structural displacement measurement using unmanned aerial vehicles and video based systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 160: 107869
- [74] Han Y T, Wu G, Feng D M. Vision-based displacement measurement using an unmanned aerial vehicle. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29: e3025
- [75] Jiang S, Zhang J, Gao C. Bridge deformation measurement using unmanned aerial dual camera and learning based tracking method. *Structural Control and Health Monitoring*, 2023, 2023: 4752072
- [76] Nasimi R, Moreu F, Fricke G M. Sensor equipped UAS for non-contact bridge inspections: Field application. *Sensors*, 2023, 23(1): 470
- [77] T/CCES-2023, 桥梁承载能力快速测试与评估技术规程
- [78] Deng L, Cai C S. Identification of dynamic vehicular axle loads: Theory and

- simulations. *Journal of Vibration and Control*, 2010, 16(14): 2167-2194
- [79] 周云, 李自强, 胡健鑫等. 基于贝叶斯理论的非接触式桥梁动态称重研究. *地震工程与工程振动*, 2023, 43(1): 43-54
- [80] Zeinali Y, Story B A. Impairment localization and quantification using noisy static deformation influence lines and iterative multi-parameter Tikhonov regularization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 109: 399-419
- [81] Chen Z W, Cai Q L, Zhu S. Damage quantification of beam structures using deflection influence lines. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(11): e2242
- [82] Alamdari M M, Kildashti K, Samali B, et al. Damage diagnosis in bridge structures using rotation influence line: validation on a cable-stayed bridge. *Engineering Structures*, 2019, 185: 1-14
- [83] Huseynov F, Kim C, O'Brien E J, et al. Bridge damage detection using rotation measurements-experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 135: 106380
- [84] Lydon M, Taylor S E, Robinson et al. Development of a bridge weigh-in-motion sensor: Performance comparison using fiber optic and electric resistance strain sensor systems. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(12): 4284-4296
- [85] Lydon M, Robinson D, Taylor S E, et al. Improved axle detection for bridge weigh-in-motion systems using fiber optic sensors. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2017, 7(1): 325-332
- [86] Algoji B, Mufti A, Thomson D. Detection of speed and axle configuration of moving vehicles using acoustic emission. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2018, 8(3): 353-362
- [87] Lydon D, Lydon M, Del Rincon J M, et al. Development and field testing of a time-synchronized system for multi-point displacement calculation using low cost wireless vision-based sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(23): 9744-9754
- [88] Zhou Y, Pei Y L, Li Z W, et al. Vehicle weight identification system for spatiotemporal load distribution on bridges based on non-contact machine vision technology and deep learning algorithms. *Measurement*, 2020, 159: 107801
- [89] Zaurin R, Catbas F N. Integration of computer imaging and sensor data for structural health monitoring of bridges. *Smart Materials and Structures*, 2009,

- 19(1): 015019
- [90] Zaurin R, Khuc T, Catbas F N. Hybrid sensor-camera monitoring for damage detection: Case study of a real bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(6): 05016002
- [91] Catbas F N, Zaurin R, Gul M, et al. Sensor networks, computer imaging, and unit influence lines for structural health monitoring: Case study for bridge load rating. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(4): 662-670
- [92] Dong C Z, Bas S, Catbas F N. A completely non-contact recognition system for bridge unit influence line using portable cameras and computer vision. *Smart Structures and Systems*, 2019, 24(5): 617-630
- [93] 周云, 周赛, 裴熠麟等. 基于大数据与区间仿射算法的非接触式桥梁结构影响线识别. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(3): 20-31
- [94] Jian X D, Xia Y, Lozano-galant J A, et al. Traffic sensing methodology combining influence line theory and computer vision techniques for girder bridges. *Journal of Sensors*, 2019, 2019(1): 1-15
- [95] Tian Y D, Zhang J, Yu S S. Vision-based structural scaling factor and flexibility identification through mobile impact testing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 122: 387-402
- [96] Dan D H, Kong Z W. Bridge vehicle-induced effect influence line characteristic function based on monitoring big data: definition and identification. *Structural Health Monitoring*, 2023, 22(5): 2987-3005
- [97] Sutton M A, Mingqi C, Peters W H, et al. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, 1986, 4(3): 143-150
- [98] Pan B, Xie H, Wang Z. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching. *Applied Optics*, 2010, 49(28): 5501-5509
- [99] Pan B, Xie H, Guo Z, et al. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation. *Optical Engineering*, 2007, 46(3): 601-622
- [100] 刘纲, 李孟珠, 蒋伟等. 古建筑彩绘梁整像素位移自适应搜索解算方法. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(11): 8
- [101] Jiang Z Y, Qian K M, Miao H. Path independent digital image correlation with high accuracy, speed and robustness. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015,

65(2): 93-102

- [102] 王琛影, 何小元. 相关识别中的曲面拟合法. 实验力学, 2000, (03): 280-285
- [103] 刘小勇, 吴小玲, 宫岩等. 基于Hermite插值的数字图像相关亚像素位移求解算法. 机床与液压, 2020, 48(22): 69-73
- [104] 潘兵, 续伯钦, 谢惠民等. 面内位移测量的基于梯度的数字图像相关方法. 光学技术, 2005, (05): 643-647
- [105] Bruck H, McNeill S, Sutton M A, et al. Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correction. Experimental mechanics, 1989, 29(3): 261-267
- [106] 潘兵, 续伯钦, 李克景. 梯度算子选择对基于梯度的亚像素位移算法的影响. 光学技术, 2005, (01): 26-31
- [107] 程依婷. 基于数字图像相关理论的非接触式结构位移测量方法研究. 湖南大学, 2022
- [108] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 22(11): 1330-1334
- [109] Wu L J, Casciati F, Casciati S. Dynamic testing of a laboratory model via vision-based sensing. Engineering Structures, 2014, 60: 113-125
- [110] Fukuda Y, Feng M Q, Shinozuka M. Costeffective vision-based system for monitoring dynamic response of civil engineering structures. Structural Control and Health Monitoring, 2010, 17: 918-936
- [111] Garrido-Jurado S, Muñoz-Salinas R, Madrid-Cuevas F J, et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. Pattern Recognition, 2014, 47(6): 2280-2292
- [112] Obrien E J, Quilligan M J, Karoumi R. Calculating an influence line from direct measurements. Proceedings of the ICE-Bridge Engineering, 2006, 159(1): 31-34
- [113] Zheng X, Yi T H, Zhong J W, et al. Rapid evaluation of load-carrying capacity of long-span bridges using limited testing vehicles. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(4): 04022008
- [114] Yan B F, Li D R, Chen W B, et al. Mode shape-aided cable force determination using digital image correlation. Structural Health Monitoring, 2020, 20(5): 2430-2445
- [115] Liu Z W, Li S Q, Wang L H, et al. Experimental investigation on high-mode vortex-induced vibration of a flexible stay cable in smooth flow. Journal of

- Bridge Engineering, 2022, 27(8): 04022068
- [116] Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration. *IEEE Trans Image Process*, 1996, 5(8): 1266-1271
- [117] Pan B, Li K, Tong W. Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(7): 1277-1289
- [118] 苏静波, 邵国建. 基于区间分析的工程结构不确定性研究现状与展望. *力学进展*, 2005, 35(3): 338-344
- [119] 李紫玮. 基于深度学习理论的桥梁上车型识别与检测跟踪研究. 湖南大学, 2019
- [120] Zhou Y, Zhou S, Hao G W, et al. Bridge influence line identification based on big data and interval analysis with affine arithmetic. *Measurement*, 2021, 183: 109807
- [121] Degrauwe D, Lombaert G, Roeck G D. Improving interval analysis in finite element calculations by means of affine arithmetic. *Computers and Structures*, 2010, 88(3-4): 247-254
- [122] Platt J C. Fast training of support vector machines using sequential minimal optimization. Cambridge: MIT Press, 1999
- [123] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423
- [124] Brigham E O. The fast Fourier transform and its applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. ser. Signal Processing Series, 1988
- [125] Moon J K, Choi S I. Performance of channel estimation methods for OFDM systems in a multipath fading channels. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2000, 46(1): 161-170
- [126] Zheng X, Yang D H, Yi T H, et al. Development of bridge influence line identification methods based on direct measurement data: A comprehensive review and comparison. *Engineering Structures*, 2019, 198(Nov.1): 109539.1-109539.8

附录A （攻读学位期间所发表的学术论文）

- [1] 周云, 张路遥, 胡锦涛等. 融合机器视觉与区间仿射算法的桥梁结构影响线实测研究. 中国公路学报, 2024, 37(02): 142-151

致 谢

入学时，总觉得毕业是很遥远的事情，而今我也执笔于此。我盯着文档左下角的页码和字数统计，思绪万千，研究生三年的科研历程绝非一本百页论文所能言明，而我在这期间承蒙的各方帮助也绝非一页纸所能书尽。

感谢导师周云教授的悉心指导与帮助。在科研方面，从选题确定、思路调整到试验开展和应用，周老师始终给予我前瞻性的指导和最优的科研条件支持，使得我的课题能够顺利完成。在工程实践方面，周老师更是为我提供了多次参与重大项目的机会，使我在读研期间积累了丰富的工程经验，为未来的职业生涯奠定了坚实的基础。在为人处世方面，周老师的自信乐观、从容豁达也深深影响着我。涓涓师恩，无以为报，铭记于心，愿周老师今后身体健康、家庭幸福、事业顺利、桃李满天下。

感谢课题组同门的陪伴和支持，在迷茫之际给予我灵感，在成功之际与我分享喜悦。特别感谢师兄胡锦楠、郝官旺对我小论文试验和写作的指导；同门张文杰，师弟陈建炜、冷建波、汪柏煊、陈祎林、魏子青、杨晨烨、刘迎澳在实验室试验和野外试验中提供的帮助。愿各位同窗毕业顺利、前程似锦。

感谢室友和朋友们与我共度三年青春，陪我疯吃疯饮后再疯狂减肥，疯玩疯闹后再疯狂学习。

感谢父母的养育之恩，凭借一家小店供我完成二十年的学业。特别感谢我的妈妈，在我每每遇到困难之际源源不断地给我提供情绪价值，让我有了从容面对一切的勇气。

最后，感谢各位专家、教授、老师能够在百忙之中参与本论文的评审和答辩。

张路遥

2024年5月20日于湖南大学