

学校代号 10532  
分类号 TU446.3

学 号 S200100171  
密 级 公开



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

## 硕士学位论文

# 基于无人机倾斜摄影技术的桥梁逆向 建模与变形测量研究

学位申请人姓名 刘鹏  
培 养 单 位 土木工程学院  
导师姓名及职称 周云教授  
学 科 专 业 土木工程  
研 究 方 向 结构健康监测  
论文提交日期 2023年5月18日

学校代号：10532

学 号：S200100171

密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

# 基于无人机倾斜摄影技术的桥梁逆向 建模与变形测量研究

国家自然科学基金（51878264、52278306）

湖南省重点研发项目（2022SK2096）

湖南省交通运输厅科技进步与创新项目（201912）

学位申请人姓名：刘鹏

导师姓名及职称：周云教授

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：土木工程

论文提交日期：2023年5月18日

论文答辩日期：2023年5月20日

答辩委员会主席：易伟建教授

**Research on reverse modeling and deformation measurement of  
bridge based on uav tilt photography technology**

by

LIU Peng

B.E. (Hunan University)2020

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Civil Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Professor ZHOU Yun

May, 2023



# 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

## 学位论文授权使用授权书

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

随着我国交通运输需求的不断提高,桥梁作为交通设施枢纽,承担着越来越重要的角色。由于长期使用和自然环境等因素的影响,桥梁的安全性能逐渐下降,给人们的生命财产安全造成了巨大的威胁。然而,对于广大的中小桥梁,有待提出更加快速有效的桥梁健康监测手段,建立一种轻量化、智能化、可持续的桥梁结构健康监测方法十分必要。无人机能够对桥梁进行近距离影像采集,具有安全、便捷、高效等优点,本文基于无人机倾斜摄影技术对桥梁逆向建模与变形测量开展研究,利用无人机采集桥梁影像建立桥梁三维实景模型和点云模型,在此基础上进行深入研究,通过参数化桥梁逆向建模过程实现对桥梁有限元逆向建模的研究;使用点云距离算法计算两期桥梁点云模型之间的距离,提出一种改进的滑动窗口算法实现对桥梁挠度曲线准确识别;利用不同算法对桥梁点云模型进行处理,准确提取桥梁线型曲线并与人工实测进行对比。本文的主要研究内容如下:

(1)介绍了无人机倾斜摄影技术基本原理,针对倾斜摄影技术建立大水域面积桥梁模型时无法采集特征点的问题,提出了“阶梯式”影像采集方法,可以准确建立桥梁底部和支座处的模型,为后续研究打下基础。

(2)研究了桥梁有限元逆向建模理论,以长沙市巴溪洲大桥为研究实例,对其进行有限元逆向建模研究,将建模过程参数化为49个参数,使用非均匀有理B样条曲线提取桥梁复杂尺寸数据,利用大数据信息和专家先验信息实现有限元模型逆向重建,对模型进行精度验证和参数分析,证明了方法的可行性和有效性。

(3)以点云距离算法理论为基础开展了桥梁挠度曲线测量方法研究。对两期点云模型使用两阶段配准方法进行配准,使用点云距离算法计算两期点云模型之间的距离,提出改进的滑动窗口算法对桥梁挠度曲线进行准确提取,开展实验室验证性试验证明方法的可行性,研究不同点云距离算法的精度差异,研究不同影像采集高度对计算精度的影响;在夏、冬两季分别采集巴溪洲大桥影像建立桥梁点云模型,准确识别了该桥在温度作用下的挠度曲线,证明了方法的鲁棒性。

(4)以点云处理理论为基础开展了桥梁线型测量研究。以长沙市梅溪湖大桥为研究实例开展桥梁线型识别研究,分别使用人工水准测量和无人机测量的方法进行线型提取,在无人机建立的点云模型基础上,分别使用了三种算法进行线型识别,通过与人工测量结果进行对比验证,证明无人机算法的准确性。

**关键词:** 无人机; 倾斜摄影; 逆向建模; 桥梁线型; 桥梁变形提取

## Abstract

With the continuous improvement of China 's transportation demand, bridges play an increasingly important role as transportation hub facilities. However, because of long-term use and the impact of natural environment factors, the safety status of many bridge structures has gradually declined, posing a huge threat to people 's lives and property. Hence, for the majority of small and medium-sized bridges, more rapid and effective bridge health monitoring methods need to be proposed. It is necessary to establish a lightweight, intelligent and sustainable bridge structure health monitoring method. UAV(Unmanned Air Vehicle) has the advantages of safety, convenience and high efficiency, and can be used for close-range image collection of bridges. Based on UAV tilt photography technology, this paper studies bridge health monitoring, Using the UAV to collect bridge images, a bridge 3D(three-dimensional) real scene model and point cloud model were established for further research. On this basis, in-depth research was performed, the finite element reverse modeling of bridge was realized by parametric bridge reverse modeling method. The point cloud distance algorithm was used to calculate the distance between the two bridge point cloud models, and an improved sliding window algorithm was proposed to accurately identify the bridge deformation curve. Different algorithms were used to process the bridge point cloud model, and the bridge alignment was accurately extracted and compared with the manual measurement. The principal research topics covered in this paper as follows :

(1) The basic principle of UAV oblique photography technology was introduced. Aiming at the problem that the bridge with large water area cannot collect feature points by oblique photography technology, a 'ladder' image acquisition method was proposed, which can accurately establish the model at the bottom of the bridge and the support.

(2) The finite element reverse modeling theory of bridge was studied. taking Baxizhou Bridge in Changsha as an example, the finite element reverse modeling was studied, and the modeling process was parameterized into 49 parameters, and the complex size data of the bridge was extracted by using the non-uniform rational B-spline curve. The large data information and expert prior information were used to realize the reverse reconstruction of the finite element model. The feasibility and

effectiveness of the method were verified by accuracy testing and parameter analysis of the model.

(3) Based on the theory of point cloud distance algorithm, the identification method of bridge deformation curve was studied. The two-stage registration method was used to register the two-stage point cloud model. The point cloud distance algorithm was used to calculate the distance between the two phase point cloud models. An improved sliding window algorithm was proposed to accurately extract the bridge deformation curve. The practicability of the method was proved by laboratory verification test. The accuracy difference of different point cloud distance algorithms was studied, and the influence of different acquisition heights on the calculation accuracy was studied. The bridge point cloud model was established by collecting the images of Baxizhou Bridge in summer and winter respectively, and the deformation curve of the bridge under the action of temperature was accurately identified, which proved the robustness of the method.

(4) In this paper, the Meixi Lake Bridge in Changsha City was taken as the research example to carry out the research on bridge alignment shape identification. The bridge alignment was extracted by artificial leveling and UAV measurement respectively. Based on the point cloud model established by UAV, three algorithms were used to identify the line shape. The accuracy of the UAV algorithm was verified by comparing with the manual measurement results.

**Key Words:** UAV ; Tilt photography ; Reverse modeling ; Bridge alignment ; Bridge deformation extraction

## 目 录

学位论文原创性声明 .....	I
摘要 .....	II
Abstract .....	III
插图索引 .....	VIII
附表索引 .....	X
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景及选题意义 .....	1
1.2 无人机技术在桥梁检测监测中的应用 .....	2
1.3 桥梁逆向建模与变形测量研究现状 .....	5
1.3.1 桥梁有限元逆向建模研究现状 .....	5
1.3.2 桥梁位移测量研究现状 .....	7
1.3.3 桥梁线型测量研究现状 .....	8
1.4 本文主要研究内容 .....	9
1.4.1 选题依据 .....	9
1.4.2 研究内容 .....	9
<b>第 2 章 基于倾斜摄影技术的桥梁模型精细化创建</b> .....	11
2.1 引言 .....	11
2.2 桥梁多视图影像采集 .....	11
2.3 无人机倾斜摄影建模关键技术 .....	14
2.3.1 特征点提取 .....	14
2.3.2 特征点匹配 .....	15
2.3.3 区域网平差空中三角测量 .....	15
2.3.4 多视图影像匹配 .....	15
2.3.5 自动切片纹理映射 .....	16
2.4 大水域桥梁建模影像采集方法 .....	16
2.5 倾斜摄影技术验证实例 .....	17
2.6 本章小结 .....	22
<b>第 3 章 基于倾斜摄影技术的桥梁有限元逆向建模</b> .....	23
3.1 引言 .....	23
3.2 桥梁有限元逆向建模概念 .....	23
3.2.1 桥梁有限元逆向建模和正向设计对比 .....	24
3.2.2 桥梁有限元逆向建模的应用 .....	24

3.3 有限元逆向建模参数化 .....	25
3.4 逆向建立桥梁有限元模型 .....	28
3.4.1 非均匀有理 B 样条算法原理概述 .....	28
3.4.2 逆向建立桥梁有限元模型 .....	30
3.5 逆向建模试验结果分析 .....	31
3.5.1 有限元模型精度验证 .....	31
3.5.2 不可靠参数分析 .....	33
3.5.3 模型修正 .....	35
3.6 本章小结 .....	35
<b>第 4 章 基于倾斜摄影技术的桥梁挠度测量 .....</b>	<b>37</b>
4.1 引言 .....	37
4.2 点云模型配准 .....	37
4.2.1 点云粗配准 .....	37
4.2.2 点云精配准 .....	39
4.3 桥梁挠度测量算法 .....	40
4.3.1 基于邻近点 (C2C) 的点云距离算法 .....	40
4.3.2 基于点到格网 (C2M) 的点云距离算法 .....	42
4.3.3 基于多尺度模型与模型 (M3C2) 点云距离算法 .....	42
4.3.4 改进的桥梁挠度提取算法 .....	44
4.4 桥梁挠度测量试验验证 .....	48
4.4.1 实验室验证性试验 .....	48
4.4.2 室外实桥试验 .....	58
4.5 本章小结 .....	62
<b>第 5 章 基于倾斜摄影技术的桥梁线型测量 .....</b>	<b>64</b>
5.1 引言 .....	64
5.2 桥梁线型提取算法 .....	64
5.2.1 基于整体最小二乘法进行坐标提取 .....	64
5.2.2 基于 Alpha Shapes 边缘检测算法进行线型提取 .....	65
5.3 梅溪湖大桥线型测量试验 .....	67
5.3.1 工程概况 .....	67
5.3.2 数据采集 .....	67
5.3.3 桥梁线型提取分析 .....	70
5.4 本章小结 .....	77
<b>结论与展望 .....</b>	<b>78</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>80</b>

致谢.....	89
附录 A（攻读学位期间所发表的学术论文）.....	90
附录 B（改进的滑动窗口算法代码）.....	91

## 插图索引

图 1.1 桥梁坍塌事故 .....	1
图 1.2 人工检测桥梁方法 .....	2
图 1.3 本文主要研究内容 .....	10
图 2.1 五视倾斜摄影 .....	11
图 2.2 飞行高度对影像精度的影响 .....	12
图 2.3 运动模糊 .....	12
图 2.4 影像重叠度 .....	13
图 2.5 技术路线图 .....	14
图 2.6 “阶梯式”摄影 .....	17
图 2.7 桥梁模型精细化创建流程 .....	18
图 2.8 长沙市巴溪洲大桥 .....	18
图 2.9 大疆 Mavic2 无人机 .....	19
图 2.10 巴溪洲大桥三维实景模型 .....	20
图 2.11 巴溪洲大桥点云模型 .....	20
图 2.12 无“阶梯式”三维实景模型 .....	21
图 3.1 成桥实验 .....	26
图 3.2 逆向建模技术路线图 .....	30
图 3.3 巴溪洲大桥 NURBS 曲面 .....	31
图 3.4 巴溪洲有限元模型 .....	31
图 3.5 静载变形对比 .....	32
图 3.6 不确定参数灵敏度分析结果 .....	34
图 4.1 二维配准示意图 .....	38
图 4.2 八叉树原理 .....	41
图 4.3 C2C 原理 .....	41
图 4.4 Delaunay 三角网 .....	42
图 4.5 C2M 原理 .....	42
图 4.6 M3C2 原理 <sup>[105]</sup> .....	44
图 4.7 滑动窗口算法原理 .....	45
图 4.8 改进的滑动窗口算法计算流程图 .....	47
图 4.9 室外验证性试验示意图 .....	49
图 4.10 室外验证性试验布置图 .....	49
图 4.11 室外验证性试验结构示意图 .....	50

图 4. 12 大疆 DJI M300RTK 和禅思 L1 .....	50
图 4. 13 两期点云模型及 4CPS 配准点 .....	52
图 4. 14 点云模型配准结果 .....	52
图 4. 15 C2C 计算云图 .....	53
图 4. 16 Delaunay 三角化平面拟合 .....	53
图 4. 17 C2M 计算云图 .....	53
图 4. 18 M3C2 计算云图 .....	54
图 4. 19 三种算法计算结果对比 .....	55
图 4. 20 桥梁挠度曲线离散性变化趋势 .....	56
图 4. 21 误差比较与直线拟合 .....	57
图 4. 22 无人机影像采集 .....	58
图 4. 23 初始点云模型 .....	59
图 4. 24 切割后的点云模型 .....	59
图 4. 25 两期点云模型及 4CPS 配准点 .....	60
图 4. 26 两期点云模型配准结果 .....	60
图 4. 27 M3C2 计算结果 .....	60
图 4. 28 支座配准误差修正示意图 .....	61
图 4. 29 巴溪洲大桥挠度曲线 .....	61
图 4. 30 无人机实测和 MIDAS 分析挠度曲线对比 .....	62
图 5. 1 Alpha Shapse 边缘检测算法原理示意图 .....	65
图 5. 2 滚动圆计算示意图 .....	66
图 5. 3 梅溪湖大桥结构示意图 .....	67
图 5. 4 桥面线型测点布置示意图 .....	68
图 5. 5 桥面线型测试测站设置及跑尺照片 .....	68
图 5. 6 梅溪湖桥模型图片 .....	69
图 5. 7 桥梁设计与实测线型对比 .....	72
图 5. 9 Alpha Shapes 边缘检测算法可视化结果 .....	74
图 5. 10 人工实测与无人机测量结果对比 .....	76

## 附表索引

表 2.1 现场实测值与模型误差 .....	21
表 2.2 模型细节对比 .....	22
表 3.1 参数分级 .....	26
表 3.2 桥梁建模材料参数 .....	26
表 3.3 桥梁建模截面参数 .....	27
表 3.4 桥梁建模位置与形状参数 .....	27
表 3.5 前三阶频率对比 .....	32
表 3.6 模型 1 与模型 2 计算值对比 .....	33
表 3.7 基于模态频率的灵敏度分析参数及校验结果 .....	35
表 3.8 修正前后结果对比 .....	35
表 4.1 试验梁挠度实测值 .....	51
表 4.2 实测节点处结果对比 .....	54
表 4.3 五种工况下测量结果对比 .....	57
表 5.1 现场实测值与误差大小 .....	69
表 5.2 主桥线型测量结果 (单位: m) .....	70
表 5.3 北引桥线型测量结果 (单位: m) .....	70
表 5.4 南引桥线型测量结果 (单位: m) .....	71
表 5.5 主桥线型测量结果 (单位: m) .....	73
表 5.6 北引桥线型测量结果 (单位: m) .....	73
表 5.7 南引桥线型测量结果 (单位: m) .....	73
表 5.8 主桥线型测量结果 (单位: m) .....	73
表 5.9 北引桥线型测量结果 (单位: m) .....	74
表 5.10 南引桥线型测量结果 (单位: m) .....	74
表 5.11 主桥线型测量结果 (单位: m) .....	75
表 5.12 北引桥线型测量结果 (单位: m) .....	75
表 5.13 南引桥线型测量结果 (单位: m) .....	75
表 5.14 三种算法测量结果对比 .....	76
表 5.15 人工测量与无人机测量工作过程对比 .....	77

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景及选题意义

随着经济的不断发展，人民群众对国家交通建设的要求不断提高，加快交通强国建设，促进我国经济建设高质量发展是我国近年来交通运输建设的主基调。桥梁是交通线路中的重要组成部分，由交通运输部发布的《2021 年交通运输行业发展统计公报》<sup>[1]</sup>显示，截止至 2021 年底，我国桥梁总数达到了 96.11 万座、7380.21 万延米，随着桥梁使用时间的增加，结构受到冻融循环、日晒雨淋、材料老化等影响，抗力不断下降，而交通负荷持续增长，载荷持续增加，由此导致了结构可靠度不断降低，既有桥梁逐渐面临安全问题，专家认为桥梁使用超过 25 年则进入了老化期，据相关部门统计，我国 40% 现有桥梁运营时间在 25 年以上，属于“老龄”桥梁<sup>[2]</sup>，桥梁安全问题对经济发展和人民安全形成了严峻的挑战。

桥梁安全关系千家万户，事关人民群众生命财产安全和经济社会平稳运行，由于部分桥梁设计理念不够先进，施工质量差，车辆超速超载严重，结构构件老化等因素，导致桥梁安全事故屡有发生，近两百年我国已发生 584 起桥梁安全事故，给国家和人民造成了巨大损失<sup>[3,4]</sup>。2004 年，辽宁省内田庄台大桥突然坍塌，该桥长达 500 余米，一辆严重超载的大货车通过，使得该桥发生脆性断裂，大桥中部坍塌长度达到 27 米<sup>[5]</sup>，如图 1.1 (a) 所示，调查组专家认定，该桥在长期车辆超载的作用下，发生了严重的损伤，从而导致了这场事故。2012 年，江西省广昌河东大桥发生一起严重的桥梁倒塌事故，事故造成 2 人死亡，2 人受伤<sup>[6]</sup>，该桥由于受到长期冲刷的作用导致倾覆，如图 1.1 (b) 所示。桥梁安全事关国计民生，一旦发生桥梁安全事故将会对人民生命安全和国家经济造成重大损失，而随着我们国家交通事业的不断发展和桥梁耐久性的持续下降，将会无可避免的发生桥梁安全问题<sup>[7,8]</sup>，识别桥梁安全状况和预防桥梁安全事故已迫在眉睫。



a) 辽宁省田庄台大桥坍塌事故



b) 江西广昌河东大桥坍塌事故

图 1.1 桥梁坍塌事故

目前桥梁监测检测方法主要是人工检测为主对桥梁进行检查,如图 1.2 所示,专业桥梁巡检人员通过桥梁检测车等设备对桥梁进行外观视觉检查,通过静动力荷载实验对桥梁内部损伤进行诊断,这些传统的方法工作量大,危险性高,存在封闭交通、检测耗时长等问题<sup>[9,10]</sup>。另一方面,一些大型桥梁依靠桥梁健康系统对桥梁进行实时的全方位的监测,这种方法虽然可以实时掌握桥梁健康状况,但是传感器会产生大量数据,对这些数据的处理耗费大量时间和人力,此外,传感器价格昂贵,维护成本高,在中小桥梁上难以推广使用<sup>[11]</sup>。目前,随着计算机技术的普及与机器视觉、神经网络、人工智能的发展,结合跨学科专业技术对桥梁安全状况进行数字化、智慧化、轻量化识别成为了当前桥梁健康监测领域的发展趋势,建立对大中小桥梁快速高效,经济可靠的结构安全评估方法具有紧迫性和重要性<sup>[12-14]</sup>。



图 1.2 人工检测桥梁方法

无人机是一种近年来新兴的桥梁检测设备,能对桥梁进行快速、安全的检测,针对目前桥梁存在的安全问题和现有桥梁检测监测方法的不足,本文拟结合无人机倾斜摄影技术研究一种新型可靠的桥梁结构快速检测方法,通过对运营阶段桥梁进行无人机建模进而实现桥梁的有限元逆向建模,通过对倾斜摄影建立的桥梁点云模型进行分析,实现非接触式测量桥梁周期性位移和线型,为桥梁结构逆向建模和变形测量领域的发展添砖加瓦。

## 1.2 无人机技术在桥梁检测监测中的应用

近年来随着无人机技术的不断发展,无人机应用于桥梁检测监测的潜能被广大研究者们不断发现并进行了挖掘,当前无人机的应用主要集中在以下三个方面:第一,利用无人机采集桥梁多视图序列影像,使用倾斜摄影技术建立桥梁三维实景模型和点云模型,在这些模型的基础上利用各种算法对桥梁进行检测监测;第二,利用无人机对桥梁进行近距离影像采集,对桥梁外观进行检查,实现桥梁损伤识别;第三,利用无人机对桥梁进行拍摄,使用机器视觉技术对桥梁的变形与振动进行测量。

在桥梁三维建模与点云处理方面,国内外学者针对无人机监测中的高精度建

模和桥梁模型的处理与应用方面开展了深入研究：

2017年，Khaloo<sup>[15]</sup>将无人机任务设计、数据采集和数据分析集成在一起，利用无人机采集的影像和分层的运动结构算法生成桥梁的三维（3D）模型，对桥梁表面缺陷进行检查，并将结果与通过激光扫描生成的模型进行比较，证明了无人机建立的模型满足缺陷检查的准确性要求。

2018年，Kim<sup>[16]</sup>研究了一种利用高分辨率视觉传感器的无人机在老化混凝土桥梁中的裂缝识别方法，首先利用无人机生成桥梁点云模型，利用基于卷积神经网络（R-CNN）的区域迁移学习检测结构表面的裂纹，并计算其厚度和长度。通过现场试验验证了所提方法能够有效识别和量化结构上的裂缝。

2019年，Pan<sup>[17]</sup>提出了利用无人机生成古建筑桥梁结构表面模型的半自动化框架理论。从上至下分割桥梁构件，利用运动恢复结构算法建立桥梁点云模型，提出了一种基于超体素结构和全局图优化的分割方法，能够有效地基于几何特征分离桥梁构件，利用分类树对桥梁构件进行识别，并进行表面建模，生成具有识别要素的表面模型。

2019年，Chen<sup>[18]</sup>利用无人机三维重建方法对桥梁进行检测，包括无人机影像采集、三维模型重建、模型质量评估和桥梁损伤检测等步骤，并提出了包含数据重复率检查、分析点分布、离群噪声评估和几何尺寸测量精度的评价机制。

2020年，Ayele<sup>[19]</sup>提出了一种用于分析桥梁损伤的方法，首先进行桥梁损伤数据收集和模型训练，再使用无人机建立了挪威一座140 m 预应力混凝土桥梁的三维数字模型，利用基于深度学习的数据分析方法对无人机图像数据进行了分析和处理，实现对桥梁进行准确地损伤性能评估。

2021年Mohammadi<sup>[20]</sup>对澳大利亚的一座桥梁分别使用无人机和地面激光扫描仪建立了点云模型，提出了一系列方法来比较点云模型在点的分布，离群噪声水平，数据完整性，表面偏差和几何精度等方面的差异，证明了所提出方法在评估这两种海量点云方面的准确性和适用性。

2020年，Bolourian<sup>[21]</sup>提出了一种利用无人机搭载激光雷达扫描仪进行桥梁检测的三维路径规划方法。该方法集成了遗传算法和A-Star算法计算裂缝等桥梁表面缺陷潜在位置，以实现无人机最大化能见度的同时最小化飞行时间。该方法可以有效地获得垂直和重叠的视图，计算出覆盖风险水平较高的区域。

在桥梁损伤识别方面，国内外学者利用无人机对桥梁损伤位置判断，损伤程度量化开展了深入的研究：

2018年，Duque<sup>[22]</sup>使用无人机进行桥梁损伤量化，提出一种包括图像质量评估和基于图像的损伤量化的四阶段无人机桥梁损伤量化方法，利用高质量的影像进行基于像素的测量，量化桥梁损伤，能对桥梁的裂缝长度、厚度和锈斑面积进行了准确识别，并与实际现场测量的损伤进行比较，证明了无人机方法的准确性。

2020年, Whitley<sup>[23]</sup>针对桥梁底部无GPS(Global Positioning System)信号的问题,提出了一种利用激光测距仪、光流传感器和实时视频遥测实现桥梁底部安全飞行的方法,将该方法应用在佛罗里达州桥梁检测工程中,证明了无人机能在无GPS信号和充满障碍的桥梁底部安全飞行。

2020年, Zollini<sup>[24]</sup>使用无人机对意大利多座历史桥梁进行表面损伤无损检测,基于对象级别检索的图像分析获得了正镶嵌体结构并对其进行处理,以识别和分类退化区域和衰减形式,成功对桥梁进行了快速检测。

2020年, Wang<sup>[25]</sup>提出了一种基于爬行无人机的桥梁结构底部裂缝检测方法,设计了高精度无限续航探测方案,对桥梁体底部裂纹应用高精度图像拼接测量算法,能够还原全景图像。对所有主流滤波方法进行评估,认为它们适用于不同形状的各种裂纹图像,对其开展了实验室验证性试验,证明该方法的测量误差小于0.1mm。

2021年, Yu<sup>[26]</sup>利用无人机对桥梁进行检测,在YOLOv4(You Only Look Once)模型的基础上提出了一种深度学习模型YOLOv4-FPM,利用聚焦损失优化损失函数,提高测量精度,利用剪枝算法对网络进行简化,加快检测速度,利用不同尺度数据构成的数据集扩大YOLOv4-FPM的可预测范围,增强其鲁棒性,通过实验室试验证明了该方法可以监测不同尺寸图像中的裂纹。

2022年, Kao<sup>[27]</sup>开发了一种带有摄像头和激光测距模块的无人机系统来检测桥梁裂缝。在无人机上安装了四个激光测距单元,测量无人机到桥梁的距离,以计算物体的投影平面并克服垂直飞行的限制,设计了双镜头系统,一个镜头用于桥梁检查,可向上旋转90度,另一个镜头用于飞行控制。采用图像处理方法提取裂纹信息并计算裂纹尺寸,野外实桥试验结果表面测量误差小于0.8%。

2022年, Yoon<sup>[28]</sup>提出了一种利用无人机损伤检测结果评估老化桥梁抗震性能的新方法,利用基于区域的卷积神经网络分析无人机采集的影像,实现桥梁的状态评估并定义损伤等级,进一步更新桥梁的有限元模型以对应相应的损伤指标,通过对一座运营桥梁进行了试验分析,地震响应相差约10%,证明了无人机评估老化桥梁抗震性能的潜力。

2023年, Kao<sup>[29]</sup>使用YOLOv4深度学习算法训练用于识别裂缝的模型,使用无人机采集影像,识别裂纹的图像转换为灰度图像,然后使用局部阈值方法转换为二值图像,再利用Canny和形态学边缘检测器两种边缘检测方法应用于二值图像,提取裂纹边缘,得到两类裂纹边缘图像,最后采用平面标记法和全站仪测量法计算裂纹边缘图像的实际尺寸,得到的精度能达到92%。

在桥梁变形与振动测量方面,国内外学者围绕无人机测量中剔除无人机自身振动和高精度测量开展了深入的研究:

2021年, Nasimi<sup>[30]</sup>提出了一种新型配备传感器的低成本无人机测量系统,该

系统集成了无人机、激光扫描仪和相机，能够对铁路桥梁进行安全、经济地非接触式的横向位移测量，将该方法测量值与 LVDT（Linear Variable Differential Transformer）实测值进行对比，证明了该方法的可行性和有效性。

2021 年，Chen<sup>[31]</sup>提出了一种将无人机与数字图像相关（Digital Image Correlation, DIC）相结合的桥梁模型振动测量方法，通过 DIC 方法对无人机拍摄的桥梁视频进行分析，跟踪测点的位移。通过建立具有固定点的平面单应变换来实现图像的几何校正，剔除了无人机自身的振动，从而得到桥梁模型的真实位移。进一步从测点的位移时程中计算振动频率和振型。通过与基于固定相机的方法进行对比，验证所提方法的有效性。

2021 年，Wu<sup>[32]</sup>提出了一种基于三维模型重建的桥梁振动测量方法，固定平面上的四个角点做为参考点，通过无人机相机标定估计每帧图像的投影矩阵，恢复桥梁上目标点的三维坐标，实现剔除无人机自身振动以测量实际位移，利用数字图像相关（DIC）方法跟踪桥梁模型上目标点的位移进而实现桥梁振动测量。与工作模态分析方法提取的桥梁固有频率进行对比，证明了方法的可行性。

2021 年，Zhuge<sup>[33]</sup>开发了一种利用无人机视觉测量桥梁挠度的非接触式测量技术，根据共面激光指示器投射在平面上的激光斑点的共线性消除无人机自身运动，并计算待测位置相对于桥墩的垂直位移。通过基于深度学习的方法提取激光光斑的中心，并开发了一种基于尺度不变特征配准的算法，用于跟踪图像序列中桥梁的特征点，根据实验室试验，测量均方根误差小于 0.5mm。

2022 年，Yan<sup>[34]</sup>提出了一种基于无人机技术测量桥梁振动的方法，利用无人机采集桥梁振动视频，采用 Kanade-Lucas-Tomasi（KLT）光流法从视频中获取桥梁的位移信号，利用经验模态分解和傅里叶变换两种方法剔除桥梁自身运动，最后，利用工作模态分析技术对位移信号进行处理，得到桥梁模态参数。

综上所述，利用无人机能对桥梁实现多维度、高精度、轻量化监测检测，能解决传统健康监测系统应用成本高、数据多的问题，将无人机应用于量大面广的桥梁群健康监测具有巨大的潜力。

## 1.3 桥梁逆向建模与变形测量研究现状

### 1.3.1 桥梁有限元逆向建模研究现状

近年来倾斜摄影与点云扫描技术发展迅速，以此为基础的结构数字化建模技术也受到了越来越多的关注和广泛的应用<sup>[35-37]</sup>。结构数字化建模是从结构实体快速获取三维几何数据实现结构数字模型重新构建，随着结构数字化建模技术的发展，桥梁有限元逆向建模技术也受到了越来越多的关注，桥梁有限元逆向建模是在项目竣工后，对工程实物进行 3D 扫描、数据采集等工作，再通过数据处理和

三维重建等过程，得到具有相同设计参数的桥梁有限元模型。国内外学者围绕桥梁有限元逆向建模开展了一系列研究。

2009年，Lubowiecka<sup>[38]</sup>使用三维激光扫描仪建立了一座中世纪砌体桥的有限元模型，并利用探地雷达确定了桥梁的材料组成，实现了对该桥的有限元逆向建模，并进行了灵敏度分析。

2015年，Conde-Carnero<sup>[39]</sup>使用三维激光扫描仪建立了一座行人桥和高架桥的精细三维点云模型，并开发了一种点云模型自动转换为有限元模型的方法，该方法能够实现对现役桥梁进行有效健康评估。

2016年，Stavroulaki<sup>[40]</sup>利用相机进行近景摄影测量建立了一座石拱桥的三维实景模型，利用探地雷达对回填深度、拱环厚度等内部信息进行确认，进一步逆向建立了该桥的有限元模型，对该桥的损伤、性能进行了分析，研究了该桥的破坏过程。

2017年，Conde<sup>[41]</sup>使用激光扫描、探地雷达、声波测试和环境振动的方式对西班牙的一座砌体拱桥桥梁内外部信息进行采集，逆向构建了该桥的有限元模型，通过与优化算法的结合对模型进行了校准，根据不同的载荷情况和土壤材料特性进行了灵敏度分析，最后基于该有限元模型实现了对结构响应的成功预测。

2018年，Bautista-De<sup>[42]</sup>融合三维激光扫描测试、环境震动测试、结构材料实验、数值模拟等多种方法逆向建立了葡萄牙一座钢筋混凝土桥梁的有限元模型，对其健康状况进行了评估，平均相对误差只有1.2%。

2019年，Sanchez-Aparicio<sup>[43]</sup>以阿维拉罗马桥为目标桥梁，集成了地面激光扫描仪、声波和冲击回波方法、探地雷达和表面波的多维度测试，将这些数据进行桥梁有限元逆向建模，进行数值模拟并生成CAD模型，从几何层面、材料层面、结构层面分别进行分析，并通过环境振动测试结果对这些有限元模型进行对比和更新。

2020年，Pepe<sup>[44]</sup>结合无人机和相机，使用摄影测量技术建立了一座两跨石拱桥的三位点云模型，基于工业基础类标准定义了桥梁材料的本构，进而实现了对该桥梁的有限元逆向建模，实现了对该桥的健康状态评估。

2021年，Batar<sup>[45]</sup>利用三维激光扫描仪建立了一座历史砖石拱桥的点云模型，在此基础上逆向建立了桥梁的CAD模型，采用混凝土损伤塑性材料模型定义了桥梁的本构，进一步逆向重建了桥梁的有限元模型。

目前开展的桥梁有限元逆向建模存在成本较高及结构内部细节信息不明确的问题。当前开展的研究主要是基于三维激光扫描仪建立结构点云模型，进而建立有限元模型。这种方法多用于房屋建筑和非水域桥中，虽然准确，但是激光扫描仪设备价格昂贵，适用性受限。对于内部信息，国内外学者通过高度假设<sup>[39,46-48]</sup>、采用精密仪器检测<sup>[38]</sup>、实验室检测<sup>[42]</sup>以及利用工业基础类标准获取<sup>[44]</sup>。然而，当

前的方法存在依赖假设较高，无法反映结构内部真实信息，或者成本较高导致适用性较低的问题，有待提出一种适用性高、能真实反映桥梁内部信息的方法。

### 1.3.2 桥梁位移测量研究现状

利用多期点云模型进行距离计算得到结构物的变形是近年来研究的热点。在倾斜摄影技术或点云扫描技术生成的点云源模型和目标模型中找到对应不动点，针对不动点使用最小二乘法构建并迭代优化目标函数 (Iterative Closest Point, ICP)，使目标模型精配准源模型，模型之间的所有点形成对应关系。计算精配准后的多期点云模型中对应的距离差来表征结构发生的位移，采用点坐标之间相减的方式得到位移值。目前常用的点云位移计算方法有点到点距离算法 (Cloud to Cloud, C2C)、点到面距离算法 (Cloud to Mesh, C2M)、多尺度模型与模型点云比较算法 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison, M3C2) 等算法，国内外学者围绕桥梁点云模型计算桥梁位移开展了深入的研究。

2017 年，Moghaddame-Jafari<sup>[49]</sup>使用固定相机对实验室简支梁进行摄影拍照，通过测量加载前后的位移值验证了摄影技术在位移测量上的可行性。同时比较了 C2C 和 M3C2 算法的差异，认为 M3C2 算法优于 C2C 算法。

2017 年，Acikgoz<sup>[50]</sup>使用地面三维激光扫描仪建立了一座砌体桥梁的三维点云模型，提出了一种新的点云距离算法，即对迭代最近点配准算法 (ICP 配准) 进行了改进，通过约束 ICP 保证相邻点云段之间的位移连续性，得到结构的三维变形值，实现了对该桥的沉降准确识别。

2018 年，Kushwaha<sup>[51]</sup>对桁架桥、梁桥、悬索桥开展了研究，融合了地面激光扫描仪和手持相机近景摄影建立了桥梁的点云模型，通过对变形前后桥梁点云模型之间的距离测量，计算桥梁产生的挠度，还实现了对道路桥面平整度检测。

2019 年，石颖<sup>[52]</sup>对点云模型中桥梁的空间形态变化分成了桥梁结构层次刚体变化、构件层次刚体变化和构件内部变形三个层次，将每个层次对应的力学性能进行了分析，对桥梁变形进行了有效的分解与识别。

2020 年，Kwiatkowski<sup>[53]</sup>对波兰的一座铸铁吊桥开展了研究，使用地面激光扫描仪和数字摄影测量方法对目标桥梁进行了变形测量，将测量结果与传统测量方法结果进行对比，测量误差在毫米级范围内，可以实现对桥梁变形的准确识别。

2021 年，司梦元<sup>[54]</sup>利用三维扫描仪建立了一个跨度 140 米的连续刚构桥的点云模型，利用滑动特征算法和 C2C 算法计算了该桥在不同加载工况下的位移，实现了对桥梁变形的高精度测量。

2021 年，骆义<sup>[55]</sup>使用三维激光扫描仪建立了拱桥的点云模型，利用 Alpha-shapes 算法提取了拱桥拱轴线型，使用 Pratt 算法计算了桥梁结构变形，还通过点云模型实现了 Abaqus 有限元模型逆向建模。

2021年,余家勇<sup>[56]</sup>使用无人机倾斜摄影技术建立了长沙市一个边坡的倾斜摄影模型和点云模型,使用M3C2算法计算了该边坡的产生的位移,通过实验室验证性试验证明了算法的准确性,进一步对工程实例开展研究,成功实现了对边坡灾害场景变化识别。

2022年,Graves<sup>[57]</sup>利用手持相机建立了一座公路桥梁的点云模型,对该桥进行了静载测试,将变形前后的两期模型进行配准,使用M3C2算法计算桥梁上目标点产生的位移,通过与现场实测结果进行对比,验证了该方法的误差在1.3mm以内,证明了该方法的可行性。

国内外学者对无人机技术和点云算法的深入研究证明了使用无人机倾斜摄影技术建立桥梁点云模型,并基于此模型计算桥梁变形值具有可行性。当前对桥梁变形的研究主要集中在三维激光扫描仪上,但是这种设备价格昂贵,在大水域桥梁中可达性差,操作不便,而无人机倾斜摄影技术可以弥补这些不足,但无人机倾斜摄影技术精度相比三维激光扫描仪更弱,如何使用合理的方法降低无人机倾斜摄影技术的误差是需要研究的重点和难点。

### 1.3.3 桥梁线型测量研究现状

桥梁线型是反映桥梁健康状况的重要指标,桥梁线型的变化可以反映桥梁的内部损伤和损伤位置,通过检测桥梁线型变化,可以及时掌握桥梁使用过程中各关键截面的挠度变化,进一步可以掌握桥梁在结构安全、行车条件、耐久性等方面的变化<sup>[58]</sup>。现有桥梁线型测量手段主要依靠水准测量方法,使用水准仪或全站仪测量各关键点相对的高程坐标,这种方法耗时耗力,还存在封闭交通和测量人员安全隐患等问题<sup>[59,60]</sup>,使用无人机对桥梁进行线型测量将有效提高桥梁线型测量的效率,对实现量大面广的桥梁群快速健康监测具有重要意义,国内外学者对智能化桥梁线型检测已开展了部分研究。

2017年,Reagan<sup>[61]</sup>开发了一种结合无人机和三维数字图像相关性的新方法,对两座在役混凝土桥梁进行了实验室测试和长期监测,证明了方法能够检测桥梁几何线型的变化,精度达到了 $10^{-5}\text{m}$ 。

2019年,Barrile<sup>[62]</sup>提出了一种利用无人机对桥梁进行航测的方法,提出了一种从数据采集、整理、成果展示到几何数据自动提取的完整桥梁普查工作流程。该方法能对桥梁进行完整的三维重建,并提取结构的几何线型,但该方法只能对局部的点进行数据采集。

2019年,何松霖<sup>[63]</sup>使用移动摄影测量技术对桥线型进行提取,将采集的影像背景进行剔除,降低背景噪点对测量的影响,使用边缘检测算子Canny提取桥梁的轮廓线,再基于3次B样条曲线对轮廓线进行拟合,实现了对桥梁线型的准确提取。

2022年,张晨畅<sup>[64]</sup>使用三维激光扫描仪对桥梁主缆进行线型测量,对点云模型进行配准降噪之后,使用圆管分割算法得到主缆的点云模型,进一步利用圆管轴线算法计算桥梁主缆中心轴线线型。

2022年,石雪飞<sup>[65]</sup>结合桥梁施工过程,提出了无人机测量桥梁线型的主要框架和基本控制参数,研究施工现场标记点布置方式和无人机航线规划设计,研究了多个参数对无人机测量精度的影响,测量精度可以达到毫米级。

2022年,Xu<sup>[66]</sup>研究了一种基于无人机视觉的桥梁几何测量的高效重建方法。利用子图像集重建桥梁子模型,使用基于深度学习的目标检测方法,结合欧氏聚类,自动生成裁剪后的子图像集,实现对桥梁的几何线型测量。

2022年,尚栋<sup>[67]</sup>使用三维激光扫描仪测量桥梁线型,在线型提取研究中,引入了凸包算法,使用Graham扫描方法对所有散乱点进行极角排序,通过扫描逐步找到凸包上的点,进而实现对桥梁线型提取。

综上所述,桥梁线型变化可以反映桥梁的损伤状况,在对桥梁进行线型监测的过程中,无人机技术具有独特的优势,可以避免传统测量中费时费力以及存在安全性等问题,其在桥梁健康监测中受到越来越多研究人员的青睐<sup>[68,69]</sup>,本文将根据工程实际,研究无人机线型监测技术新方法及其在桥梁健康监测工程中的应用。随着无人机技术和计算机技术的发展,无人机桥梁健康监测方法一定会在桥梁结构安全评估、智慧桥梁等方面发挥更大的作用。

## 1.4 本文主要研究内容

### 1.4.1 选题依据

本文的研究选题基于国家自然科学基金项目——《基于星载 InSAR 变形测量和信息共享平台数据的大跨度桥梁结构状态评估方法》,项目的主要研究内容是围绕星载 InSAR 技术建立大跨度桥梁结构健康监测的理论方法,本文基于以上项目所提出的基于 InSAR 变形测量技术的桥梁结构识别框架,开展基于无人机技术的桥梁逆向建模与变形测量方法研究,将无人机监测结果与 InSAR 测量结果进行对比验证,实现对桥梁多维度、高精度、智能化、轻量化监测,提高桥梁结构识别结果,以期实现本课题组“空天地一体”桥梁健康监测大框架中“天”的研究部分。

### 1.4.2 研究内容

本文通过研究无人机倾斜摄影技术和大水域桥梁影像采集方法进而建立桥梁三维实景模型和点云模型,在这些模型的基础上针对不同的工程问题,通过研究不同的算法实现多尺度桥梁结构检测监测研究,具体如图 1.3 所示,主要研究内容如下:

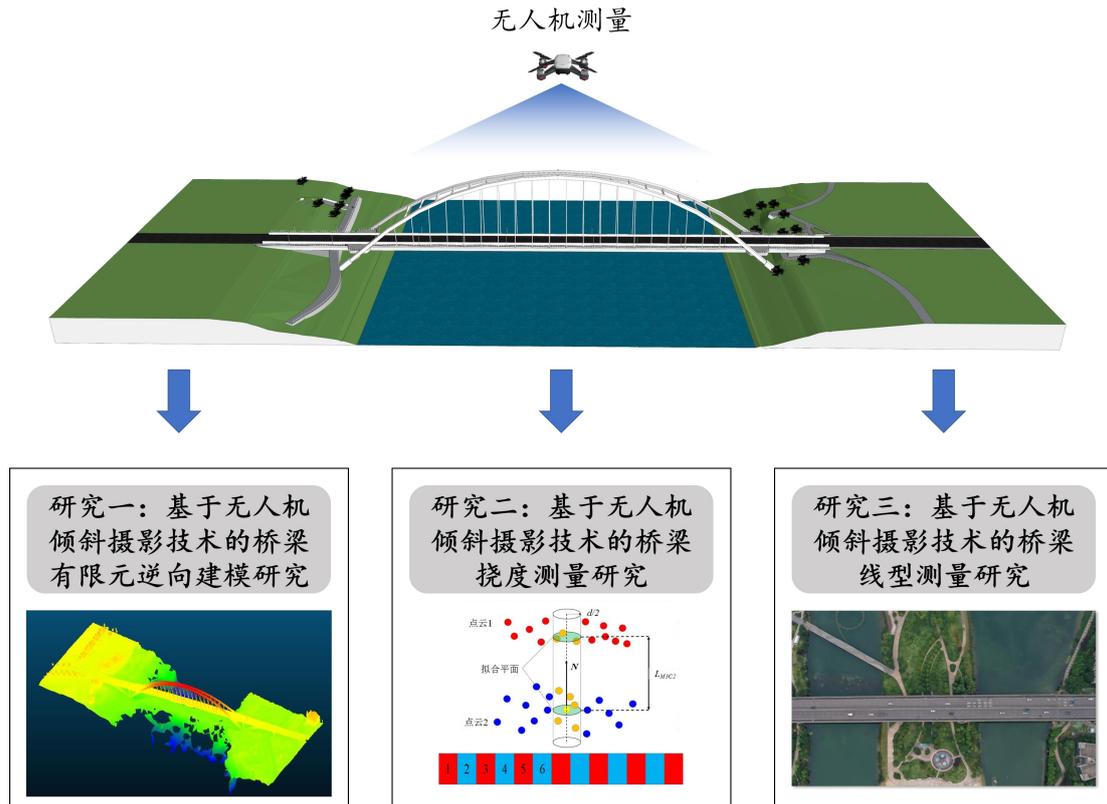


图 1.3 本文主要研究内容

(1) 利用无人机实现对桥梁快速有限元逆向建模。首先参数化桥梁有限元建模过程为 49 个参数,引入基于运动恢复结构和多视图立体匹配算法的倾斜摄影技术,结合无人机多视角序列影像构建目标桥梁三维实景模型,引入非均匀有理 B 样条算法提取桥梁复杂结构曲面,获取桥梁几何数据。通过大数据信息和桥梁设计规范、设计标准图集、现场实测等调查方法获取无人机无法观测得到的桥梁内部结构参数,实现通过视觉外观、大信息数据和专家先验信息重建桥梁有限元模型,对模型进行精度验证和参数分析,进一步校正模型。

(2) 利用无人机实现全桥挠度曲线提取。使用无人机倾斜摄影技术建立桥梁变形前后两期点云模型,对两期模型进行粗、精两阶段配准,使用点云距离算法(C2C、C2M、M3C2)计算两期点云模型之间的距离,基于抽样统计原理提出一种改进的滑动窗口算法实现对桥梁挠度曲线进行快速准确的提取,通过实验室验证性试验验证算法的准确性,并研究不同的无人机影像采集高度对测量精度的影响,进一步通过野外实桥试验验证算法的鲁棒性。

(3) 利用无人机实现对桥梁线型快速识别。利用无人机建立目标桥梁点云模型,分别使用人工测量线型方法和无人机测量线型方法提取桥梁线型,在无人机倾斜摄影建立目标桥梁点云模型的基础上,分别使用整体最小二乘法、Alpha Shapes 边缘检测算法和改进的滑动窗口算法对桥梁线型进行提取,与人工实测结果对比分析,验证无人机技术的准确性和鲁棒性,通过工作量的对比,证明无人机方法可以极大提升工作效率。

## 第 2 章 基于倾斜摄影技术的桥梁模型精细化创建

### 2.1 引言

本章的目的在于从原理上分析无人机倾斜摄影技术建立实景模型和点云模型的过程，并基于此提出一种实用的大水域面积下桥梁模型精细化创建方法。因此本章将介绍基于运动恢复结构（Structure from Motion, SfM）和多视图立体匹配算法（Multi-View Stereo, MVS）的倾斜摄影技术，梳理建立桥梁实景模型和点云模型的原理。由于水面的流动性和反光性，难以从水面上提取到特征点进行匹配，导致模型无法解算或产生大量空洞，因此传统的五视图倾斜摄影方法不能适用于大水域面积下桥梁倾斜摄影建模。本章从倾斜摄影技术原理出发，提出了一种实用的“阶梯式”摄影方法和一些提高摄影精度的措施，对长沙市巴溪洲桥进行了实例验证和对比分析，验证了该方法的实用性，为本文后续的逆向建模和变形测量研究做好前置工作。

### 2.2 桥梁多视图影像采集

桥梁的多视图影像采集是无人机建模技术的基础，高质量的多视图影像有利于创建精细桥梁模型。本小节为后续无人机倾斜摄影技术建立精细化桥梁三维实景模型和点云模型并开展研究打下基础，主要从飞行航线规划、运动模糊、POS 数据与像控点、影像重叠度等方面进行探讨和研究。

#### 1. 飞行航线规划

对桥梁进行全方位的建模一般使用五视倾斜摄影方法采集桥梁多视图影像，需要从高空对桥梁进行前视、后视、左视、右视、下视五个角度进行影像采集，对桥梁进行拍摄时需要将无人机云台倾斜一定角度，采集各立面详细纹理信息，如图 2.1 所示<sup>[56]</sup>。

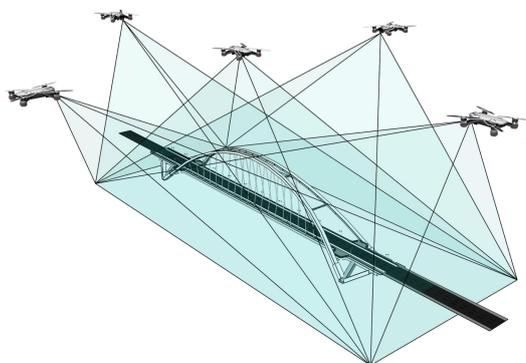


图 2.1 五视倾斜摄影

采用单镜头无人机对桥梁进行航线规划时，应对桥梁进行准确定位，了解桥

梁概况和周围环境，根据地形环境对航线进行相应调整优化，调整好相应飞行参数，对桥梁使用五视倾斜摄影方法采集桥梁影像，必要时调整为手动飞行。

飞行高度是航线规划中的重要参数，直接影响影像的精度和模型精度，飞行高度对影像精度的影响如图 2.2 所示，具体计算过程如式 2.1 所示<sup>[70]</sup>：

$$P \times f \times L = L_s \times D \quad (2.1)$$

式中， $P$  为影像精度 (m/Px)， $f$  为云台焦距 (m)， $L$  为图像尺寸 (Px)， $L_s$  为传感器宽度 (mm)， $D$  为飞行高度。由上式可知，在给定云台设备下，飞行高度越低，影像精度越高，在确保无人机安全的情况下，应尽量降低影像采集高度。

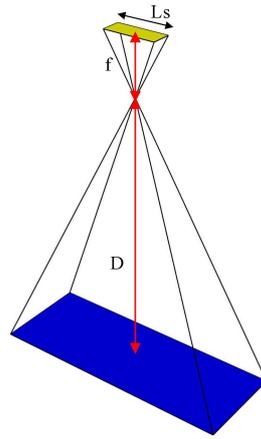


图 2.2 飞行高度对影像精度的影响

## 2. 运动模糊

在云台采集影像的过程中，由于无人机持续地以一定速度运动，因此采集到的影像会产生运动模糊，如图 2.3 所示<sup>[70]</sup>。运动模糊会使特征点也变得模糊，从而导致解算中的特征点提取与匹配、空中三角测量产生很大误差，严重影响建模精度。运动模糊的公式如式 2.2 所示<sup>[70]</sup>：

$$S = V \times T \quad (2.2)$$

式中， $S$  为单次曝光飞行的距离 (m)， $V$  为飞行速度 (m/s)， $T$  为曝光时间 (s)，在一次曝光中， $S$  宜小于 1/4 倍地面分辨率。

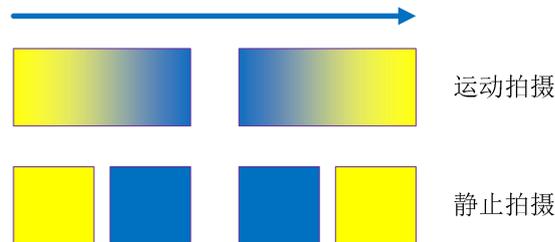


图 2.3 运动模糊

## 3. POS 数据与像控点

无人机 POS (Position) 数据是无人机在一次拍摄过程中记录到的无人机的经度、纬度、飞行高度、航向角、俯仰角、偏侧角等信息，POS 数据是空三解密的

基础,利用携带真实 POS 数据的影像建立的实景模型和点云模型中的结构尺寸即为真实尺寸;像控点是摄影测量控制加密的基础,使用高精度 RTK 标注地面点的真实地理坐标位置,这个已知地理坐标的位置点即为像控点,像控点真实坐标的输入能使软件在解算时消除计算误差,提高计算精度,无人机在高空进行影像采集时,由于镜头等误差会导致影像失真,采集影像的区域越大,误差积累越多,需要布控的像控点就越多。

POS 数据的精度对空中三角测量有很大的影响,进而对后续建模精度会产生很大影响,高质量的 POS 数据能辅助还原完整的几何细节,提高空中三角测量的效率,因此在影像采集时要避免无人机受到干扰,影响其接收到的卫星信号质量。像控点能辅助空三建模,减少建模过程中的误差累积,消除远距离几何失真,提高建模精度,由于三个点确定一个空间,因此当测区范围较大时,至少加入三个以上分布均匀的像控点,一般情况下,像控点数目越多,精度越高<sup>[71]</sup>。

#### 4.影像重叠度

为了保证采集影像的连续性,使计算机在解算时能找到特征点并进行匹配,影像采集时应满足重叠度要求,根据我国《低空数字航摄与数据处理规范》(GB/T 39612-2020)要求,航向重叠度应控制在 65%-75%,最小不能低于 53%;旁向重叠度应控制在 30%-45%,最小不能低于 8%,在河流等区域进行影像采集时,重叠度设计值宜适当加大。规划航线拍摄时,为达到科学研究和土木工程测量精度的要求,影像航向重叠度宜设置在 75%以上,旁向重叠度宜设置在 70%以上,如图 2.4 所示<sup>[56]</sup>。

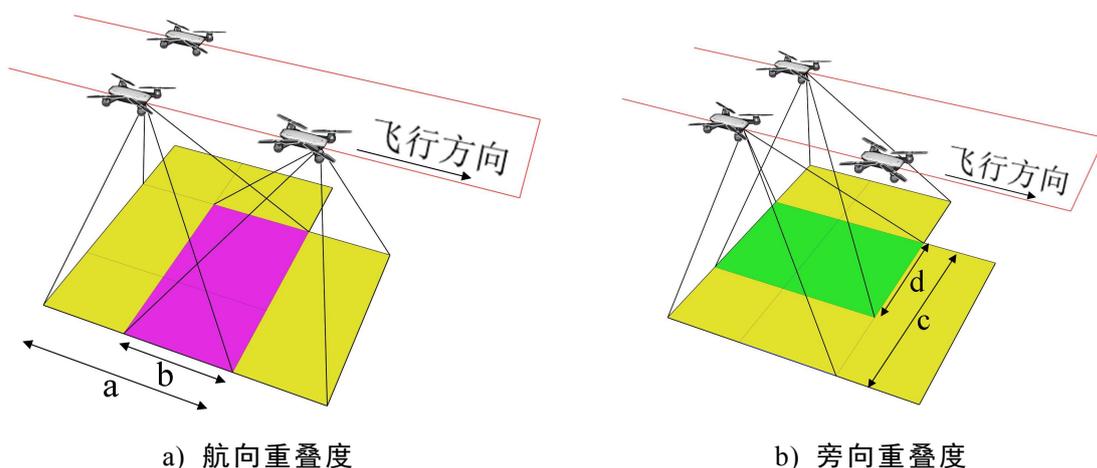


图 2.4 影像重叠度

其中,航向重叠度  $h$  和旁向重叠度  $p$  的计算公式如下式所示:

$$h = \frac{b}{a} \quad (2.3)$$

$$p = \frac{d}{c} \quad (2.4)$$

式中， $a$  为影像的宽度， $b$  为沿航线方向两幅影像的重叠长度； $c$  为影像的长度， $d$  为垂直航线方向两幅影像的重叠长度。

## 2.3 无人机倾斜摄影建模关键技术

对采集好的多视图影像使用基于运动恢复结构和多视图立体匹配算法 (SfM-MVS) 的倾斜摄影建模技术建立桥梁的三维实景模型和点云模型，具体流程包括特征点提取、特征点匹配、区域网平差空中三角测量、多视图影像匹配、自动切片纹理映射等步骤<sup>[56]</sup>，如下图所示。

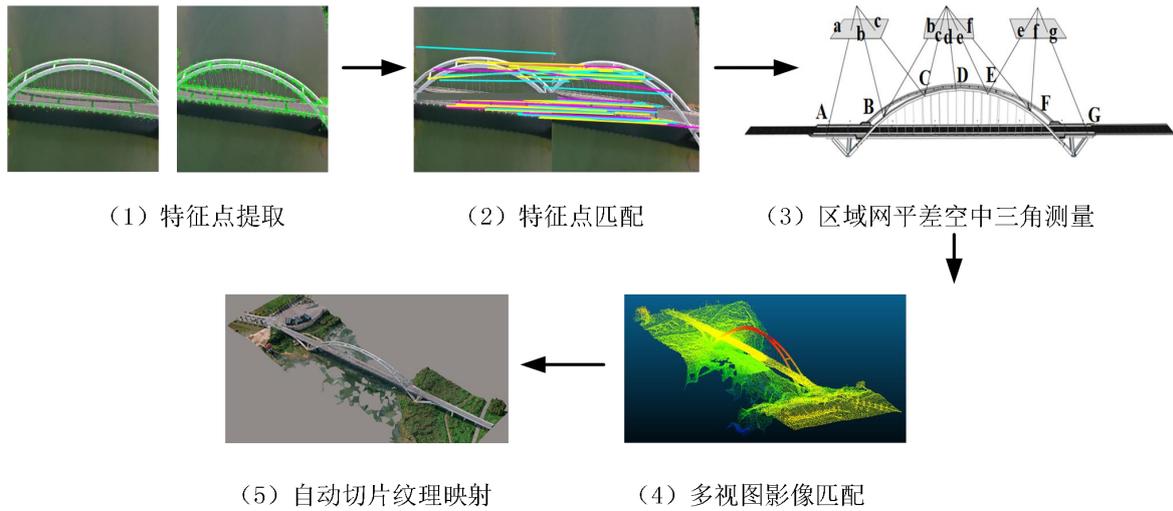


图 2.5 技术路线图

### 2.3.1 特征点提取

利用尺度不变特征变换算法构建尺度空间提取和定位无人机影像序列特征点并确定其特征方向。使用高斯核函数建立图像高斯尺度空间<sup>[72]</sup>：

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2.5)$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

式中， $I(x, y)$  为原始图像， $\sigma$  为尺度空间因子， $*$  表示卷积运算符， $G(x, y, z)$  为高斯函数， $(x, y)$  代表图像的像素坐标。

使用差分高斯构建高斯金字塔进行极值检测：

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (2.7)$$

式中， $k$  为相邻高斯尺度空间的比例因子；提取尺度空间的极值点作为特征点。

### 2.3.2 特征点匹配

为了对图像中的局部特征进行描述和匹配，为每个特征点分配一个基准方向。利用图像梯度方法求取该特征点的稳定方向，使特征点提取与影像尺寸、方向无关，降低无人机倾斜摄影建模过程中，因外部环境影响，造成的尺度差异以及相片畸变、旋转等问题。具体为对高斯金字塔中识别到的特征点，采集其在高斯金字塔图像邻域窗口内像素的梯度和方向分布<sup>[72]</sup>：

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (2.8)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{L(x+1, y) - L(x-1, y)}{L(x, y+1) - L(x, y-1)} \quad (2.9)$$

式中  $m(x, y)$  为梯度的模值， $\theta(x, y)$  为梯度的方向。同时利用无人机图像中的 POS 数据，构建图像空间拓扑结构，利用最近邻原理可有效提高匹配特征点的速度，高效建立同名像点。

### 2.3.3 区域网平差空中三角测量

以摄影中心、像点、物点所组成的光束线为平差的基本单元，使用中心投影共线方程进行平差。在空间中旋转、平移各个光束线，以达到最佳交会，利用中心投影共线方程统一平差，联合计算出各影像的相机姿态参数和加密点的真实地理坐标。即<sup>[73]</sup>：

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + \Delta y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (2.10)$$

式中， $(x, y)$  为像点坐标； $(x_0, y_0)$  为像主点坐标， $X, Y, Z$  为像点坐标对应的物方点坐标， $X_s, Y_s, Z_s$  为成像投影中心坐标， $(a_i, b_i, c_i, i=1, 2, 3)$  是三个姿态角的方向余弦。将上式线性化后，当内方位元素已知时，则可以得到其误差方程<sup>[73]</sup>：

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{\partial x}{\partial b} \delta b + \frac{\partial x}{\partial a} \delta a + \frac{\partial x}{\partial c} \delta c + \frac{\partial x}{\partial X_s} \delta X_s + \frac{\partial x}{\partial Y_s} \delta Y_s + \frac{\partial x}{\partial Z_s} \delta Z_s + \frac{\partial x}{\partial X} \delta X + \frac{\partial x}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial x}{\partial Z} \delta Z - l_x \\ v_y &= \frac{\partial y}{\partial b} \delta b + \frac{\partial y}{\partial a} \delta a + \frac{\partial y}{\partial c} \delta c + \frac{\partial y}{\partial X_s} \delta X_s + \frac{\partial y}{\partial Y_s} \delta Y_s + \frac{\partial y}{\partial Z_s} \delta Z_s + \frac{\partial y}{\partial X} \delta X + \frac{\partial y}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial y}{\partial Z} \delta Z - l_y \end{aligned} \quad (2.11)$$

将无人机影像平差单元构建为整体平差区域进行计算，使用最小二乘法计算误差方程，构建稀疏点云。

### 2.3.4 多视图影像匹配

使用多视图立体视觉匹配算法加密稀疏点云，利用 Harris 和 DoG 算子计算所

有图像的特征点，利用匹配算法计算稀疏三维点云结构，将这些匹配点定义成种子面片，定义  $V(p)$ ， $R(p)$  为可视图集，则光度误差函数可定义为<sup>[66]</sup>：

$$g(p) = \frac{1}{|V(p) \setminus R(p)|} \sum_{I \in V(p) \setminus R(p)} h(p, I, R(p)) \quad (2.12)$$

其中， $h(p, I_1, I_2)$  为光度差异函数，由 1 减归一化互相关函数 NCC 得到：

$$h(p, I, R(p)) = 1 - NCC(I, R(p)) \quad (2.13)$$

对光度差异函数  $g(p)$  进行优化，使其取值最小，以优化面片的方向向量和中心点，基于此实现对种子面片进一步扩展，过滤错误面片，迭代扩散，得到稠密的面片结构，完成密集点云的重建。

### 2.3.5 自动切片纹理映射

采用 Delaunay 三角化方法对密集点云数据进行三角剖分建立不规则三角网 (Triangulated Irregular Network, TIN)，具体为使用 Bowyer-Watson 算法，定义一个包含全部点云坐标的三角形计算区域，从这个计算集合中定义一个三角形 ABC，其顶点为  $A(x_1, y_1)$ ， $B(x_2, y_2)$ ， $C(x_3, y_3)$ ，计算三角形 ABC 的外接圆，再插入一个点 Q，找到所有三角形，并使这些三角形的外接圆包含此点<sup>[56]</sup>：

$$x_0 = \frac{(y_2 - y_1)(y_3^2 - y_1^2 + x_3^2 - x_1^2) - (y_3 - y_2)(y_2^2 - y_1^2 + x_2^2 - x_1^2)}{2(x_3 - x_1)(y_2 - y_1) - 2(x_2 - x_1)(y_3 - y_1)} \quad (2.14)$$

$$y_0 = \frac{(x_2 - x_1)(x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2) - (x_3 - x_2)(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)}{2(y_3 - y_1)(x_2 - x_1) - 2(y_2 - y_1)(x_3 - x_1)} \quad (2.15)$$

$$r = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \quad (2.16)$$

将这些三角形形成的空腔进行删除，新点与空腔节点相连，形成新的三角形网格，如此反复，直到所有点都被插值。

将三维网格进一步封装成无纹理的三维白膜，构建空间点和影像中坐标的单射关系，将二维影像纹理映射到三维白膜上，最终完成三维实景模型的重建。

## 2.4 大水域桥梁建模影像采集方法

在传统的倾斜摄影建模研究中，采集对象多是房屋、边坡等结构，影像采集方法简单，采集的影像特征点丰富，建模难度不高，在现有的桥梁逆向建模研究中，研究对象多是古建筑桥、高架桥、或水域面积比较少的桥梁，在这些研究中，使用无人机倾斜摄影建模技术对桥梁进行建模时，桥梁下部是地面或者小面积水域，地面和建筑纹理丰富，软件解算时能较好的提取到特征点，建模效果较好，不会出现空洞等问题。

在大水域面积下进行无人机倾斜摄影建模时，水面表面光滑，纹理特征稀少，

使用算法进行解算时无法找到匹配的特征点，导致实景模型和点云模型产生大量空洞，距离水面较近的桥梁也会受到影响，导致桥梁的三维实景模型上产生空洞、重叠等问题，同时传统的五视倾斜摄影无法获取到桥梁底部的照片，建立出来的实景模型和点云模型缺失桥梁底部和支座部分，为了解决这些问题，本研究采用三种摄影方式进行影像采集。

以长沙市巴溪洲大桥为例进行说明，该桥东西走向，跨长 280m，桥宽 9.5m，矢高 24.89m，首先采用五视倾斜摄影采集目标桥梁多视图影像数据，采集目标区域一个正射及四个倾斜角度影像，飞行高度 60m，航向重叠度 80%，旁向重叠度 80%，云台俯仰角度 $-45^{\circ}$ ，使用 DJI Pilot 飞控软件设置航线自动采集。然后对目标桥梁进行细节补拍，对目标区域进行四周环绕摄影，设置飞行高度 60m，云台俯仰角度 $-45^{\circ}$ ，使用 DJI Pilot 飞控软件设置航线进行四周环绕飞行，手动调整云台水平角度并进行影像采集。最后采用“阶梯式”摄影方式采集桥梁底部影像，以桥梁一侧南北两边距桥梁 100m，高度 80m 处为飞行起点，桥梁另一侧底部为终点，每前进 5m 和下降 5m 拍摄一张影像，手动调整航线和云台角度，确保桥梁底部位于影像中间，如此反复，直到无人机获取到桥梁另一侧底部结构影像，在实际影像采集过程中，无人机的角度和方位与以上航线大体一致即能建立精细实景模型。采用“阶梯式”摄影方式能使桥梁底部影像与五视倾斜摄影影像的重叠度满足要求，防止建模软件解算时无法匹配桥梁底部的同名特征点而导致解算失败，具体航线如图 2.6 所示。

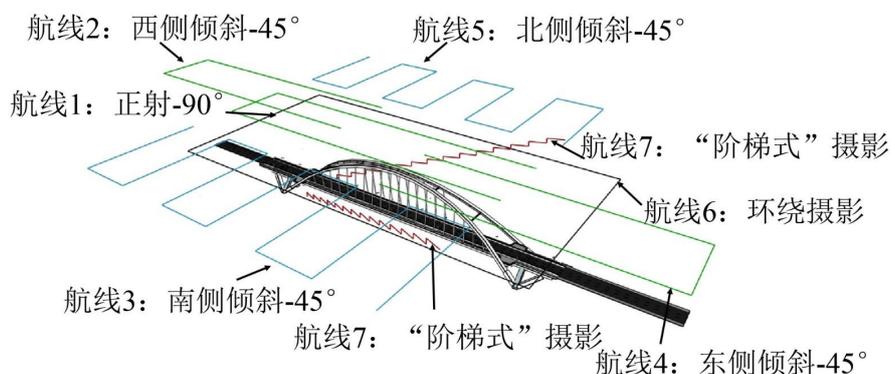


图 2.6 “阶梯式”摄影

## 2.5 倾斜摄影技术验证实例

为证明上述理论和方法的有效性，本研究开展实桥试验进行验证，具体技术路线如图 2.7 所示。

### 1. 试验对象与设备

本次试验研究对象为巴溪洲大桥，该桥位于湖南省长沙市岳麓区，结构形式为飞燕式钢箱提篮拱，该桥跨长 280m，桥面宽度 9.5m，矢高 24.89m，拱肋的结

构形式为全焊提篮式钢箱拱，拱轴系数 1.8，拱肋截面内倾角为  $8^\circ$ ，23 对吊索承受桥面全部荷载，桥梁桥面及拱肋下部分为钢筋混凝土结构，拱肋上部分为钢结构，由五道钢箱横撑连为整体（图 2.8）。

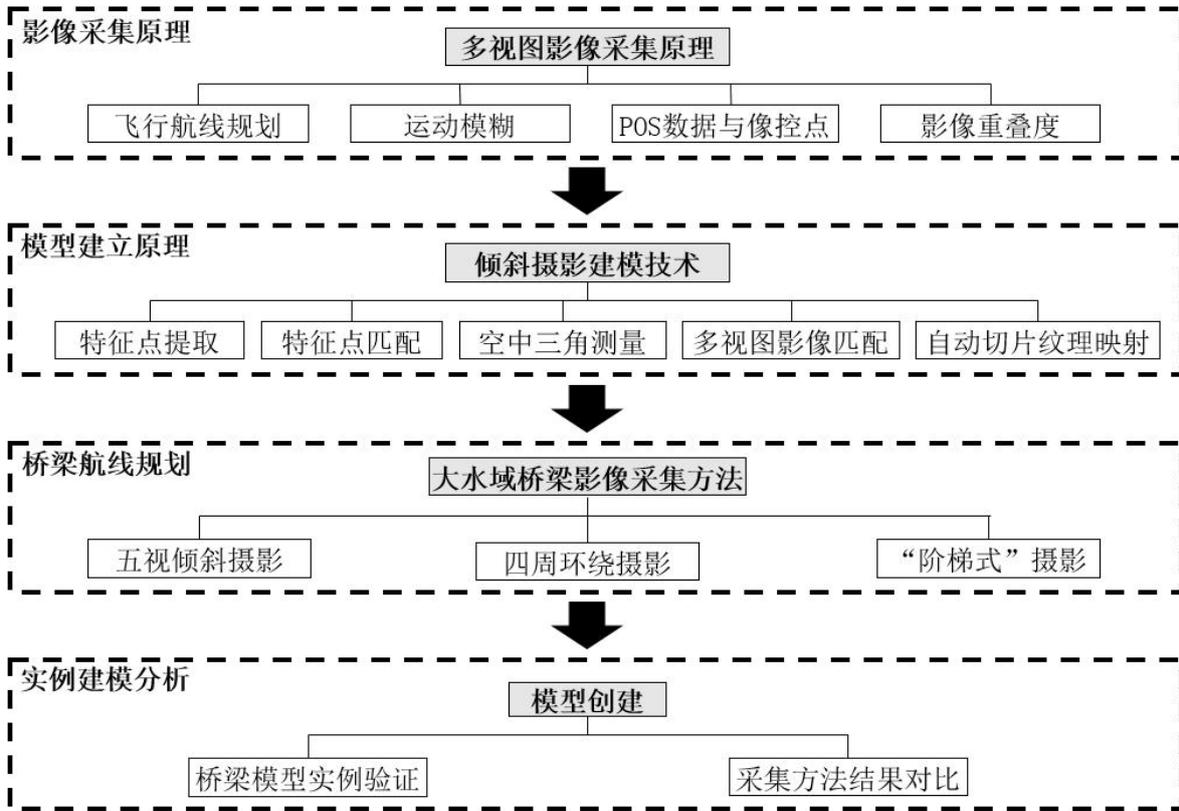
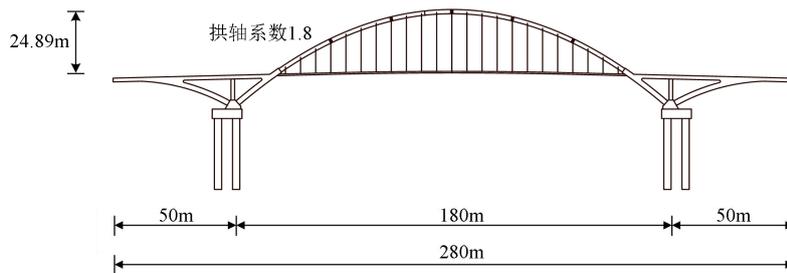


图 2.7 桥梁模型精细化创建流程



a) 巴溪洲大桥现场图



b) 巴溪洲大桥结构示意图

图 2.8 长沙市巴溪洲大桥

本次试验设备采用 DJI Mavic2 型无人机,其最大像素 2000 万,等效焦距 28mm,可实时接收全球卫星导航系统信号,获取准确的无人机飞行定位信息,影像分辨率为  $5472 \times 3468$ ,具有全向感知系统,可实现前后、左右、上下全方位避障。快门速度可达  $1/8000s$ 。

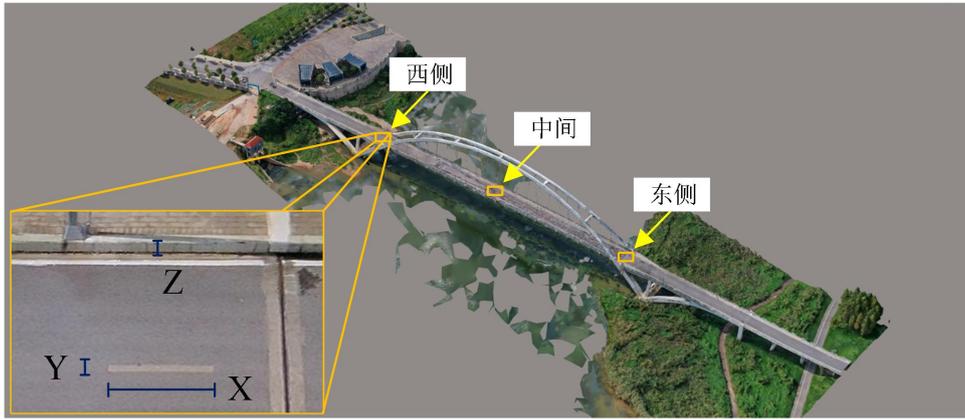


图 2.9 大疆 Mavic2 无人机

## 2. 三维实景模型和点云模型

数据采集宜在晴朗、光线良好、风力较小,可见度高的环境下进行,本次试验于 2021 年 8 月对该桥梁进行了数据采集,使用无人机航线规划软件 DJI Pilot 进行自动多视图影像采集,根据公式 (2.1),若采集精度要达到  $1\text{cm}/\text{px}$ ,本研究所用无人机影像采集最低高度应不高于  $59.85\text{m}$ ;运动模糊根据式 (2.2) 进行计算,设置飞行速度为  $5\text{m}/\text{s}$ ,单次曝光拍摄影像飞行的距离为  $1/1600\text{m}$ ;为保持 POS 数据精度要求,应在无人机接收到足够数量卫星信号时进行采集;飞行时设置航向重叠度为  $80\%$ ,旁向重叠度为  $80\%$ ,具体飞行航线和飞行方法详见 2.4 节大水域桥梁建模方法。

目前市场上常用的三维建模软件有大疆智图、Pix4D、ContextCapture、PhotoScan 等多个成熟的大型建模软件,本研究通过综合考虑,决定采用 ContextCapture10.17 建模软件进行建模,该软件在精度控制和建模质量上具有较好效果,但是对计算机性能和建模时间有更高要求。对使用三种摄影方式采集的影像数据进行处理,依据 2.3 节所述的 SfM-MVS 算法原理,使用 ContextCapture 软件重建巴溪洲大桥三维实景模型,如图 2.10 所示;巴溪洲大桥点云模型如图 2.11 所示。从图中可知,所建立的桥梁实景模型能较好反映桥梁真实尺寸和纹理;所建立的桥梁点云模型点质量较高,分布均匀且密集,桥梁底部和支座处的模型清晰完整,能较好的反映桥梁真实情况。



a) 巴溪洲大桥桥面整体模型



b) 巴溪洲大桥底面和支座模型

图 2.10 巴溪洲大桥三维实景模型

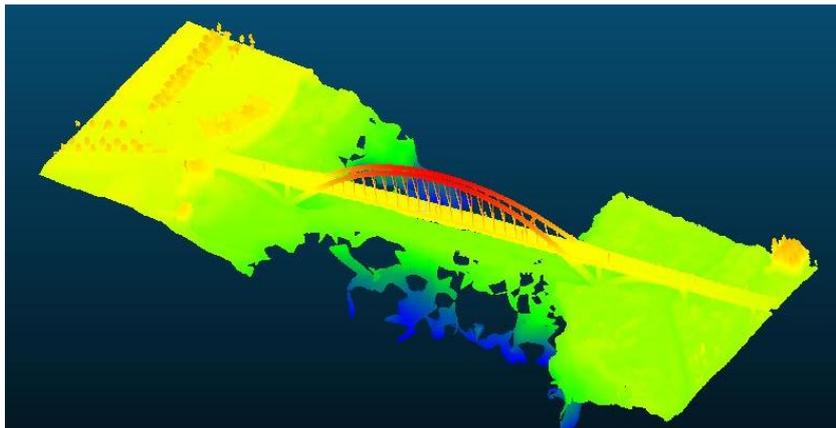


图 2.11 巴溪洲大桥点云模型

### 3.模型精度验证

为验证本研究建立的三维实景模型和点云模型的精度，计算模型的误差大小，对巴溪洲大桥的桥梁东侧、西侧和中间的 3 条道路分道线及 3 处车行道与人行道的高度差进行了实测，如图 2.10 (a) 所示。从所建立的实景模型中提取相应的模型值与实测值进行比较，利用均方根误差计算公式对所有待测点进行误差分析，

用均方根误差和平均实测长度的比值作为误差率，以分道线  $X$  向（桥梁横向）和  $Y$  向（桥梁纵向）长度误差表征模型  $X$  向和  $Y$  向精度，以车行道与人行道高度差表征模型  $Z$  向精度。 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向以及空间三维精度计算方法如下式所示<sup>[56]</sup>：

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T'_i)^2} \quad (2.17)$$

( $T = X, Y, Z$ )

$$S = \sqrt{S_X^2 + S_Y^2 + S_Z^2} \quad (2.18)$$

式中， $T_i$  和  $T'_i$  表示  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向第  $i$  段现场实测值和模型分析值， $S$  为均方根误差。

相应的计算结果如表 2.1 所示， $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  向及三维误差均在 2% 以内，三维实景模型精度和云台精度，飞行高度、光照条件等密切相关，本模型精度满足要求。

表 2.1 现场实测值与模型误差

	X 向/mm		Y 向/mm		Z 向/mm		三维/mm
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	
桥西侧	2001	1984	198	200.65	270	274	
桥中	2002	2014	202	207.63	273	269	-
桥东侧	1998	1974	198	199.82	274	277	
均方根误差	18.34		3.74		3.7		19.08
误差率	0.92%		1.88%		1.36%		0.94%

#### 4. 有无“阶梯式”摄影建模结果对比

仅有五视倾斜没有“阶梯式”摄影的建模结果如图 2.12 所示。从图中可以看出，传统建模采集方法建立的桥梁模型在桥梁各个部分都会产生比较明显的质量缺陷。



图 2.12 无“阶梯式”三维实景模型

具体细节对比如表 2.2 所示。

表 2.2 模型细节对比

部位	无“阶梯式”摄影模型	有“阶梯式”摄影模型
桥拱	桥拱残缺	完整清晰
桥面	模型重叠模糊	完整清晰
桥底	底部信息缺失	完整清晰

由图 2.12 和表 2.2 可知，使用“改进的多视图影像采集方法”建立的模型比仅有传统五视倾斜摄影方法建立的模型在模型质量和建模精度上都具有更好的效果，可以认为本研究提出的“阶梯式”摄影方法可以有效提高在大水域面积下的桥梁建模完整度和精度。

## 2.6 本章小结

本章主要介绍了利用无人机倾斜摄影技术建立桥梁精细三维实景模型和点云模型的技术原理和流程方法，详细介绍了多视图影像采集中的关键步骤，给出了相关参数的设置建议，讲解了基于 SfM-MVS 算法的无人机倾斜摄影建模技术流程，并基于这些步骤和技术原理提出了一种适用于大水域桥梁的精细化建模影像采集的新方法。主要内容总结如下：

(1) 具体介绍了多视图影像采集中对建模精度影响较大的几个关键步骤：飞行航线规划、运动模糊、POS 数据与像控点、影像重叠度，结合桥梁精细化建模的特点和要求，针对性的给出了相关参数的设置建议。

(2) 介绍了基于 SfM-MVS 算法的无人机倾斜摄影建模技术方法：特征点提取、特征点匹配、区域网平差空中三角测量、多视影像匹配、自动切片纹理映射，为后续研究提供了理论基础。

(3) 根据上述的关键步骤和技术方法，结合大水域桥梁精细化建模要求，提出了一种“阶梯式”倾斜摄影方法，能对桥梁进行准确、高质量的建模，并在巴溪洲桥案例中验证了该方法的有效性和可行性。

## 第 3 章 基于倾斜摄影技术的桥梁有限元逆向建模

### 3.1 引言

逆向建模是从结构实体快速获取三维几何数据实现结构数字模型重新构建，在桥梁领域，目前逆向建模技术主要应用在古建筑保护的数字博物馆逆向建模和高架桥等非水域桥的 BIM 逆向建模上，随着结构数字化建模技术的发展，桥梁有限元逆向建模技术也受到了越来越多的关注，桥梁有限元逆向建模是在项目竣工后，对工程实物进行 3D 扫描、数据采集等工作，再通过数据处理和三维重建等过程，得到具有相同设计参数的有限元模型。针对桥梁有限元逆向建模问题，本文将对桥梁有限元逆向建模技术开展研究，主要包括参数定义、参数获取、建模分析等步骤。利用无人机倾斜摄影技术重建目标桥梁三维实景模型，使用非均匀有理 B 样条技术（Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS）拟合桥梁复杂曲面提取目标桥梁的详细几何信息，结合大数据信息和专家先验信息实现桥梁 MIDAS 有限元模型重建，进一步对有限元模型进行参数分析并校正模型，研究桥梁逆向建模过程中的关键问题<sup>[74]</sup>。有望为桥梁健康检测和区域抗震分析提供技术支持。

### 3.2 桥梁有限元逆向建模概念

桥梁有限元逆向建模是相对桥梁有限元模型正向建模而言的，传统的桥梁有限元模型正向建模是在桥梁总体设计概念建立时便开始进行的，随着图纸的深入和完善，正向建模的有限元模型逐渐成型，项目主体结构竣工后，对桥梁进行测试试验以修正有限元模型，此时桥梁有限元模型的正向设计基本完成，通过该模型可以预测桥梁在各种响应下的行为。

桥梁逆向建模是在桥梁实体结构竣工后，通过使用基于图像的建模方法（Image-Based Modelling, IBM）或基于范围的建模方法（Range-Based Modelling, RBM）<sup>[44]</sup>建立桥梁数字模型，进一步基于调查的方法获取桥梁的其他内外部参数实现对桥梁有限元模型快速逆向重建。其中 IBM 方法是基于相机或无人机等被动传感器获取结构多视角序列视图影像，使用 SfM-MVS 算法建立结构三维实景模型，提取结构尺寸数据<sup>[75-77]</sup>。IBM 方法成本较低，但受天气因素影响大，精度较低。RBM 方法是利用三维激光扫描仪（Terrestrial Laser Scanner, TLS）等主动传感器扫描目标桥梁结构，获取目标桥梁点云模型，再对点云进行优化和处理建立结构点云模型<sup>[78,79]</sup>。RBM 方法精度较高，受外界影响小，但成本也更高，适用性受到限制。

桥梁是重要的交通基础设施结构，桥梁的安全关乎国计民生，桥梁有限元模

型在结构健康检测<sup>[80]</sup>、抗震分析<sup>[81]</sup>、事故分析<sup>[82]</sup>等方面应用广泛，在实际工程中，由于桥梁年久失修、图纸丢失<sup>[83]</sup>、和图纸权限及保密原因，研究人员难以获得目标桥梁的设计图纸，亦或桥梁在进行突发事件和区域抗震分析时，需要短时间内高效建立有限元模型<sup>[84]</sup>，然而，桥梁有限元模型正向设计速度缓慢，对桥梁群进行大范围建模会消耗大量的人力、物力、财力和时间<sup>[85]</sup>，对于历史桥梁和遇到桥梁图纸缺失的情况时，正向设计建立桥梁有限元模型的难度更是极大，逆向建模概念的提出对解决以上问题具有重要意义，因此有待提出一种快速可靠的桥梁逆向有限元建模技术。

### 3.2.1 桥梁有限元逆向建模和正向设计对比

桥梁有限元逆向建模和传统正向设计对比存在的优势和不足如下：

桥梁有限元逆向建模具有速度快、成本低的优点，对于图纸缺失的桥梁，逆向建模技术的优点更加凸显。逆向建模创建的桥梁三维实景模型和点云模型是真实结构的反映，能给用户带来直观的视觉体验，在这些模型的基础上进行深入的研究还可以实现对桥梁结构进行尺寸测量、线型测量、病害识别、变形监控等多种用途，这是正向设计无法比拟的<sup>[86]</sup>。

正向设计的桥梁有限元模型是贯穿桥梁设计阶段和施工阶段的，对桥梁内部和细节信息把控十分到位，建立的有限元模型具有更加丰富的信息，能够更加准确地预测和反映桥梁的实际状况，而逆向建立的有限元模型对内部信息把控不足，计算结果和精度也不如正向设计的模型<sup>[86]</sup>。正向设计的桥梁有限元模型还可以在施工阶段时指导施工，而逆向建立的有限元模型只能在某些方面进行应用，应用面相比而言不如正向设计的模型。

### 3.2.2 桥梁有限元逆向建模的应用

桥梁逆向建模是融合 IBM 和 RBM 方法的一种技术，使用无人机倾斜摄影技术建立桥梁三维实景模型和点云模型以及使用三维激光扫描仪建立桥梁点云模型都是高效的数字建模技术，这些技术在桥梁结构领域中融合会产生更大的作用和更加广泛地应用，主要如以下几个方面<sup>[86]</sup>：

#### 1. 桥梁结构分析与健康监测

在桥梁结构领域中，桥梁有限元模型对工程师和研究人员具有重要作用。对于国内日益增加的“老龄”桥梁，由于历史等原因造成图纸丢失无法建立桥梁有限元模型，桥梁有限元逆向建模可以有效弥补这一问题。对于桥梁群区域抗震分析，有限元模型在分析中发挥了重要作用，桥梁有限元逆向建模的应用可以有效减少建模所耗费的时间和资源，为区域抗震分析提供技术支持。对于突发桥梁事故，有限元逆向建模技术可以实现快速对桥梁事故进行分析，为后续桥梁维修和事故责任判定提供参考。

## 2. 古建筑桥梁遗产保护

利用桥梁有限元逆向建模技术建立古建筑桥梁的三维实景模型、点云模型、有限元模型等数字模型是一种有效的古建筑桥梁数字保护方法，这些数字模型还可以用来建立虚拟数字博物馆以向观众展示，甚至还可以通过数字模型实现对古建筑桥梁的重现。

## 3. 尺寸测量和病害检查

由无人机或相机建立的桥梁三维实景模型可以反映桥梁真实纹理细节，可以通过三维实景模型对桥梁上的裂缝、形变等病害进行定量和定性的分析。利用桥梁三维实景模型还可以对桥梁外观尺寸进行任意的测量。相比传统的人工检查病害和人工测量，这种方法省时省力，没有安全隐患问题。

## 4. 桥梁线型与变形监测

由三维激光扫描仪或无人机建立的桥梁点云模型可以详细的反映桥梁坐标位置信息，通过对点云进行计算分析，可以实现对桥梁的线型进行测量。对多期点云进行对比分析时，还可以对桥梁实现变形监测。

### 3.3 有限元逆向建模参数化

首先，参数化有限元逆向建模过程，使逆向建模转换为确定参数的过程，从结构组成和参数来源对参数进行详细分类，并根据参数来源的可靠性对参数进行可靠度分级，进一步实现对不可靠参数的参数分析，降低逆向建立的有限元模型的不确定性，提高模型精度。

基于材料强度、截面尺寸、构件相对位置及形状，连接方式四个方面对逆向工程进行参数化建模，通过三维实景模型确定桥梁外部参数，调查方法确定桥梁内部参数，建模过程即确定参数的过程。参数来源分为四个部分：无人机倾斜摄影、现场实测、规范参考取值、大数据获取，其中大数据获取是指通过网络中的相关文献、资料等途径获取。获取桥梁建模参数后，考虑到参数来源不同，其准确性也不一样，有必要对参数进行准确可靠程度分级，以研究不确定参数对结构模型精度的影响。依据参数的可靠性对获得的参数进行分级(Level)，从0级(L0)到5级(L5)共六个级别，L0为完全不可靠，L5为非常可靠，参数的分级的详细原则如表3.1所示。

本研究以长沙市岳麓区巴溪洲桥为研究对象，对该桥开展桥梁有限元逆向建模研究，本研究团队于2014年对该桥梁进行了成桥试验，对该桥进行了静载挠度测试和动载模态频率测试<sup>[87]</sup>，如图3.1所示，目前该桥通行交通量不大，结构状态良好，该桥的基本介绍详见第二章。

表 3.1 参数分级

可靠度等级	分级原则
完全不可靠 (L0)	无法获取到的未知参数
非常不可靠 (L1)	通过规范确定的, 变化范围较大或通过无人机只能获取小部分数据的参数
不可靠 (L2)	通过规范确定的, 变化范围较小或通过无人机只能获取部分数据的参数
一般可靠 (L3)	通过规范确定的, 比较可靠或通过无人机能获取到绝大部分数据的参数
比较可靠 (L4)	通过网络大数据 (论文等) 获取的或通过无人机能获取到全部数据的参数
非常可靠 (L5)	现场测量的参数

为简化有限元逆向建模过程, 本研究对模型进行参数分类, 根据上述参数化原则和参数分级细则, 将巴溪洲大桥建模过程参数化为 49 个参数, 具体的参数内容和分级如表 3.2-表 3.4 所示。



图 3.1 成桥实验

表 3.2 桥梁建模材料参数

序号	建模参数	数据来源	L 等级
1	立柱与拱肋混凝土材料强度	现场测量	L5
2	桥面混凝土材料强度	未知	L0
3	基础混凝土强度	大数据信息	L4
4	钢材材料强度	大数据信息	L4
5	拉索材料强度	未知	L0

表 3.3 桥梁建模截面参数

序号	建模参数	数据来源	L 等级
1	钢吊杆直径	现场测量	L4
2	钢箱拱肋壁厚	未知	L1
3	钢箱拱肋外形尺寸	无人机	L4
4	横撑壁厚	规范	L1
5	横撑外形尺寸	无人机	L4
6	主跨下拱肋外形尺寸	无人机	L4
7	边跨端部	无人机	L3
8	边跨标准截面	无人机	L2
9	边跨-高度渐变截面	无人机	L2
10	边跨横梁外形尺寸	未知	L0
11	中跨横梁	无人机	L3
12	边跨-宽度渐变截面	无人机	L3
13	拱横梁	无人机	L2
14	跨中主梁外形尺寸	无人机	L3
15	边跨最宽截面	无人机	L3
16	主梁截面外形尺寸	无人机	L3
17	主梁截面空洞尺寸	规范	L2
18	主跨异性拱肋	无人机	L4
19	立柱	无人机	L3
20	边跨下拱肋	无人机	L3
21	基座	无人机	L1
22	承台	大数据信息	L4
23	桩基	大数据信息	L4

表 3.4 桥梁建模位置与形状参数

序号	建模参数	数据来源	L 等级
1	桥面坡度	无人机	L4
2	边跨坡度	无人机	L4
3	桥面长度	无人机	L4
4	桥面各关键点位置	无人机	L4
5	立柱与下拱肋的交点	无人机	L4
6	钢箱拱悬链线方程	无人机	L4
7	边跨下拱肋抛物线方程	无人机	L4

(续表)

序号	建模参数	数据来源	L 等级
8	横撑位置	无人机	L4
9	异性混凝土拱肋顶点	无人机	L4
10	拱肋上钢和混的交点	无人机	L4
11	悬链线倾斜角度	无人机	L4
12	主跨异性拱肋偏心	无人机	L3
13	承台厚度	大数据信息	L4
14	承台与基座的相对位置	未知	L0
15	桩基数量	大数据信息	L4
16	桩基相对位置	规范	L3
17	桩基深度	大数据信息	L4
18	基桩固结	规范	L3
19	边跨简支	规范	L3
20	节点间弹性支承	规范	L3
21	节点刚性连接	规范	L3

### 3.4 逆向建立桥梁有限元模型

本次现场试验使用 DJI Mavic2 无人机采集长沙市巴溪洲大桥多视图序列影像，使用基于 SfM-MVS 算法的无人机倾斜摄影技术建立桥梁三维实景模型和点云模型，具体的采集对象、采集设备、采集方法、采集流程、采集结果见第二章。

#### 3.4.1 非均匀有理 B 样条算法原理概述

NURBS 能对复杂曲面进行准确识别，能实现对桥梁复杂尺寸准确提取，NURBS 是 3D 几何图形的数学表示，在 3D 建模内部空间使用曲线和曲面精确定义几何轮廓和外形，其数学定义如下<sup>[88]</sup>：

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i} \quad (3.1)$$

式中， $C(u)$ 为曲线的位置向量， $P_i$ 是控制点， $w_i$ 是权因子， $N_{i,p}(u)$ 是  $p$  次样条基函数，基函数由递推函数定义<sup>[88]</sup>：

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (3.3)$$

式中， $u_i$  为节点矢量  $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{n+p+1}\}$  中的第  $i$  个元素。

非均匀的含义是指节点矢量间距和值是任意值，由此在各定义区域上得到变化的混合函数形状，使控制曲线的形状具有更大自由度；节点矢量的取值是区分非均匀和均匀的依据，合理的节点矢量值会形成开放的均匀样条。有理的含义是指两个多项式函数之比。有理样条即为两个样条多项式函数的比。

由上式可知，NURBS 曲线由四个参数定义：阶数、控制点、节点矢量和权因子。NURBS 的阶数在数学上定义了分段多项式混合函数，多项式阶数越高，曲线和曲面越灵活。控制点由一组不少于（阶数+1）的点组成，其作用是确定曲线位置。节点矢量定义如何以适当的平滑度将多项式片段连接在一起；一般有两种定义：均匀（节点间距恒定）与非均匀（节点间距可变）。权重确定控制点的权值，当一条曲线的所有控制点都具有相同权重时（通常等于 1），该曲线称为非有理曲线，NURBS 曲线简化为 B 样条曲线，否则，称为有理曲线<sup>[88]</sup>。

当存在多重节点序列时，样条曲线会更接近重复节点位置。端节点若重复了  $d+1$  次，那么  $d$  阶的 B 样条曲线会在最后一个控制点进行插值。为了解决样条曲线无法跨越全部控制顶点序列，对首尾两个端节点进行重复，使样条曲线插值到首尾控制点。对于无周期性的样条曲线，节点向量为<sup>[89]</sup>：

$$U = \left[ \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{m+1}, u_{m+1}, \dots, u_{m-k-1}, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{m+1} \right] \quad (3.4)$$

即对节点向量两端重复了  $m+1$  个相同节点，使曲线能够通过控制多边形的首末端点并与首末两边相切。

由于 NURBS 曲线函数的节点参数不在参数轴上均匀分布，需要单独计算不同的节点向量生成的 B 样条基函数，并且由于算法中有权因子，导致曲线的轨迹点计算费时费力，因此在实时插补前就确定非均匀有理 B 样条曲线轨迹的计算公式相关系数，降低实时插补计算量，提高非均匀有理 B 样条曲线插补的实时性。

若曲线使用三次非均匀有理 B 样条曲线表示，即  $u = 3$ ，则第  $i$  段曲线可以由以下矩阵形式表示<sup>[89]</sup>：

$$C_i(t) = \frac{\sum_{j=i-3}^3 w_j d_j N_{i,3}(u)}{\sum_{j=i-3}^3 w_j N_{i,3}(u)} = \frac{[1, t, t^2, t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} d_{i-3} \\ w_{i-2} d_{i-2} \\ w_{i-1} d_{i-1} \\ w_i d_i \end{bmatrix}}{[1, t, t^2, t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} d \\ w_{i-2} \\ w_{i-1} \\ w_i \end{bmatrix}} \quad (3.5)$$

式中， $t \in [0, 1]$ ， $i = 3, 4, \dots, n$ ，整理可得：

$$C_i(t) = \frac{P_0 + P_1t + P_2t^2 + P_3t^3}{P'_0 + P'_1t + P'_2t^2 + P'_3t^3} \quad (3.6)$$

式中，控制点  $d_i$  和权因子  $w_i$  为已知， $M_i$  只和节点矢量有关，也为确定值， $P_i$  和  $M_i$ 、 $w_i$ 、 $d_i$  相关，也为确定值，即式中各系数均为确定值，且与插补点参数没有关系，能在插补前求出，式中  $i$  由 3 取到  $n$ ，因此对整个非均匀有理 B 样条曲线，能通过计算得到的参数共有  $n-2$  组，根据插补点的位置在插补中动态选择相应系数。对于曲线  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标分别有<sup>[89]</sup>：

$$C_x(t) = \frac{P_{Ax_1} + P_{Ax_2}t + P_{Ax_3}t^2 + P_{Ax_4}t^3}{P'_{Ax_1} + P'_{Ax_2}t + P'_{Ax_3}t^2 + P'_{Ax_4}t^3} \quad (3.7)$$

$$C_y(t) = \frac{P_{Ay_1} + P_{Ay_2}t + P_{Ay_3}t^2 + P_{Ay_4}t^3}{P'_{Ay_1} + P'_{Ay_2}t + P'_{Ay_3}t^2 + P'_{Ay_4}t^3} \quad (3.8)$$

$$C_z(t) = \frac{P_{Az_1} + P_{Az_2}t + P_{Az_3}t^2 + P_{Az_4}t^3}{P'_{Az_1} + P'_{Az_2}t + P'_{Az_3}t^2 + P'_{Az_4}t^3} \quad (3.9)$$

式中， $t \in [0,1]$ ， $i = 3, 4, \dots, n$ 。

### 3.4.2 逆向建立桥梁有限元模型

根据上述的方法和理论，对桥梁进行逆向建模，具体的技术路线图如下图所示：

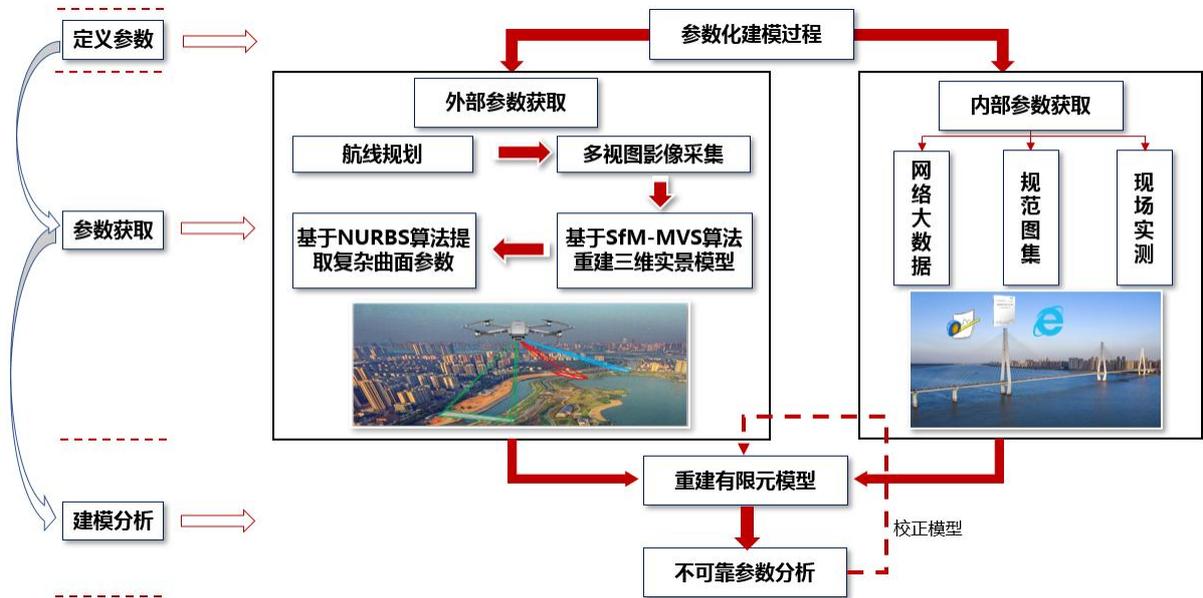


图 3.2 逆向建模技术路线图

根据 2.5 节建立桥梁实景模型和点云模型进行逆向建模，基于 3.4.1 节 NURBS 方法获取桥梁的拱肋曲面，将 SfM-MVS 算法生成的桥梁三维点云模型导入到 Rhinoceros 软件中，该软件根据点云模型生成复杂且精密的 NURBS 曲面，能有效降低点云模型由于点云粗糙度、点分布不均的影响，提高复杂构件和关键构件

的尺寸数据准确度，如图 3.3 所示。随后将曲面导入到 AutoCAD 中，利用 CAD 确定截面尺寸和钢拱曲线的关键点坐标，实现对复杂曲面尺寸提取，利用 Matlab 拟合拱肋曲线的悬链线方程，得到拱轴系数为 1.797，与设计值 1.8 较为接近。

使用 Midas 软件进行逆向建模，根据表 3.2-3.4 中的参数和参数进行手动建模，参数数据的来源如表 3.2-3.4 中所述，对于未知的参数，定义一个合理值进行建模，后续对其进行不可靠参数分析。桥梁有限元模型最终建模结果如图 3.4 所示，定义有无大数据信息模型分别为模型 1 和模型 2。

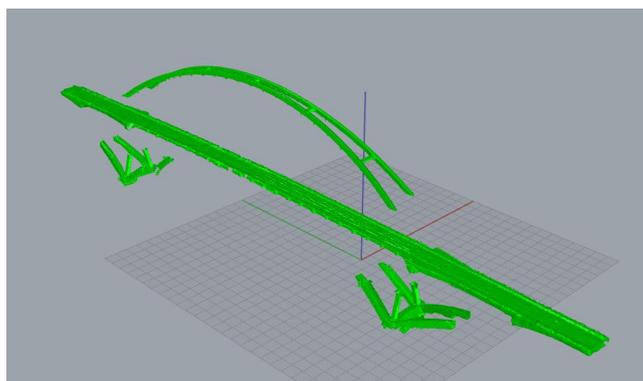


图 3.3 巴溪洲大桥 NURBS 曲面

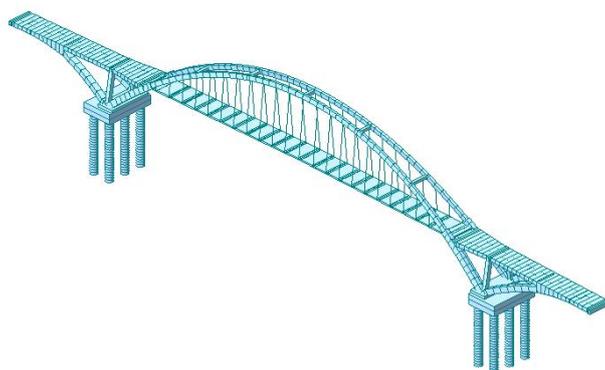


图 3.4 巴溪洲有限元模型

## 3.5 逆向建模试验结果分析

### 3.5.1 有限元模型精度验证

前面已基于获取的参数对巴溪洲大桥实现了桥梁有限元模型逆向重建，接下来对重建的有限元模型进行精度验证和参数分析，并基于分析结果矫正有限元模型。

静载挠度和模态频率是评估有限元模型准确度的重要指标，本文基于静载挠度和模态频率使用校验系数和前三阶模态频率误差评估有限元模型精度；为研究参数对建模精度的影响，对模型进行灵敏度分析。

校验系数  $\eta$  是评价桥梁安全状况以及工作性能的一个重要指标，可以通过  $\eta$

值的大小判定桥梁有限元模型的精确程度。由静载试验实测应力值或者变形值与有限元模型分析计算结果比值得到，如下式所示。

$$\eta = \frac{D_e}{D_r} \quad (3.10)$$

式中， $D_e$ 、 $D_r$ 表示实测挠度与有限元计算挠度。 $\eta \leq 1$ 说明有限元分析结果偏于安全。 $\eta = 1$ 说明有限元分析结果接近实测结果。

将模型 1 与实桥试验的分析结果<sup>[87]</sup>进行对比。选取变形量最大的主跨中部加载 4 台车工况下的静载变形及桥梁前三阶振动频率进行对比，计算结果与实测结果的对比如图 3.5 所示，前三阶振动频率对比结果列于表 3.5。

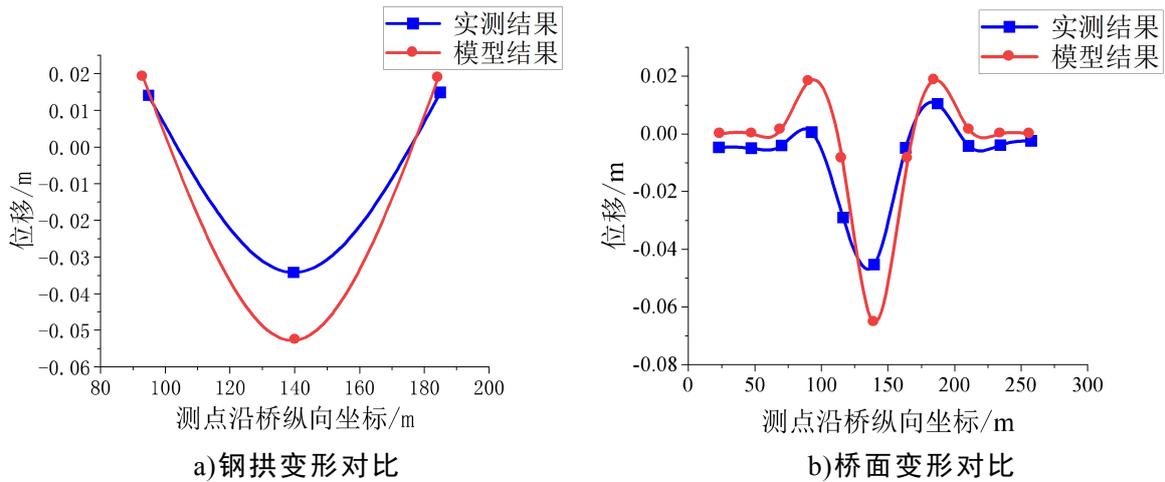


图 3.5 静载变形对比

使用校验系数评估模型静态挠度，钢拱和桥面校验系数在 0.57-0.79 之间，满足《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01-2015)规定的钢筋混凝土拱桥挠度校验系数在 0.5-1.0 的要求。结果之间存在的误差主要是由于建模参数的取值误差引起的，包括桥梁实景模型的误差和不可靠参数的误差，对于不可靠参数，后续对其进行灵敏度分析与模型校正，以减少这部分误差的影响。由于在逆向建模时未考虑钢筋对结构的影响，模型预测偏于保守。

表 3.5 前三阶频率对比

阶数	实测频率	模型频率	误差
一阶	0.61 Hz	0.61Hz	0%
二阶	1.00 Hz	1.01Hz	1%
三阶	1.83 Hz	1.80Hz	2%

由表 3.5 可知，前三阶分析振动频率与实测值较为接近，最大误差在 2% 以内，精度满足要求。分析静载变形和模态频率可知，有限元模型的分析计算结果与实桥试验实测结果吻合较好，基于无人机倾斜摄影技术逆向建立的桥梁有限元模型可以反映桥梁的实际状况。

考虑无法从大数据信息获取到参数的场景，剔除这部分参数重建有限元模型，

在模型 2 中删除基座以下部分，设置基座完全刚性连接，通过分析得到模型 2 的校验系数和模态频率与模型 1 对比结果如下表所示：

表 3.6 模型 1 与模型 2 计算值对比

	校验系数		模态频率		
	钢拱	桥面	一阶	二阶	三阶
模型 1	0.65-0.79	0.57-0.70	0.61	1.00	1.83
模型 2	0.68-0.80	0.56-0.72	0.61	1.01	1.83

由表可知，模型 1 与模型 2 的计算结果比较接近，仅依靠视觉外观和专家先验信息重建的模型也可较为真实的反映桥梁实际状况，说明此方法也可以应用在无法从大数据信息获取参数的场景中。根据实际情况，本研究在以下分析中以模型 1 为基准。

### 3.5.2 不可靠参数分析

对不可靠参数进行分析是为了了解不可靠参数对模型输出的影响程度，找到较为敏感的参数并对模型进行校正，降低逆向建立的有限元模型的不确定性，提高预测精度。本研究对不可靠参数分析使用灵敏度分析方法，灵敏度分析是分析有限元模型相对于输入参数（不确定参数）的敏感程度的方法，常用的分析方法是利用灵敏度函数对于变量的偏导数进行分析。然而，求偏导函数的方法受所取自变量的限制，不能得到灵敏度函数在整个自变量空间中的敏感度。随着灵敏度研究的深入，国内外学者开始考察模态参数在灵敏度分析中随参数在自变量空间中变化的规律。准确的灵敏度分析对模型修正具有重要意义，对提高灵敏度函数收敛速度、获取不确定参数和提高参数识别精度都具有重要影响。本研究对不可靠参数进行灵敏度分析是研究影响模型输出的各个敏感参数，使用迭代循环的方法对结构不确定参数进行准确识别<sup>[90]</sup>。本研究选用静载挠度和模态频率两种数据分别构成的目标函数进行灵敏度分析，如式 3.11 和式 3.12 所示。

$$F(t,i) = \sum_{i=1}^n |d_{ai} - d_{ei}| \quad (3.11)$$

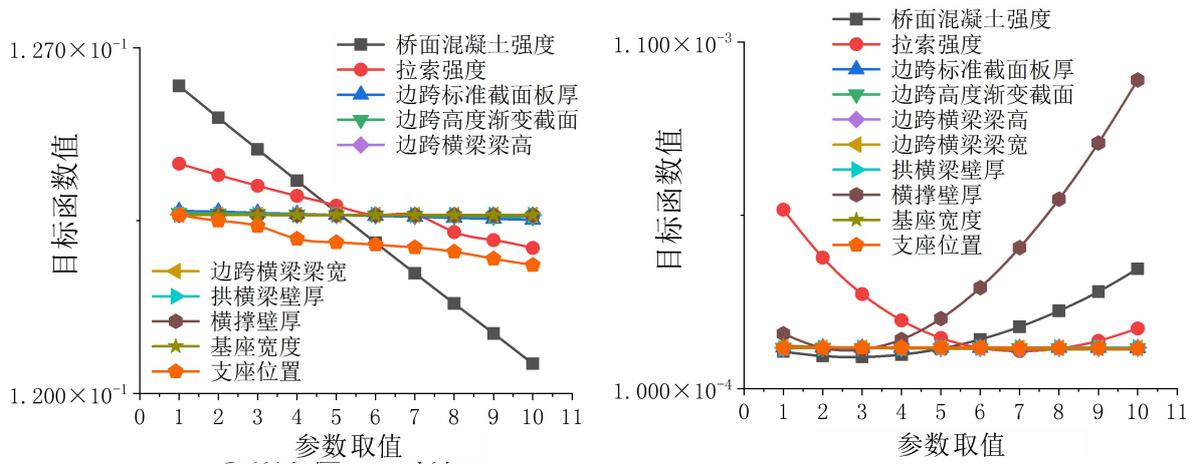
式中， $d_{ai}$  表示实测测点的有限元模型挠度计算结果； $d_{ei}$  表示静载试验中的实测挠度； $t$  为不确定参数， $i$  表示测点编号。

$$F(t,i) = \sum_{i=1}^n \frac{f_{ai} - f_{ei}}{f_{ei}} \times 100\% \quad (3.12)$$

式中， $f_{ai}$  和  $f_{ei}$  为有限元模型分析得到的模态频率和由 SSI 方法分析得到的模态频率。

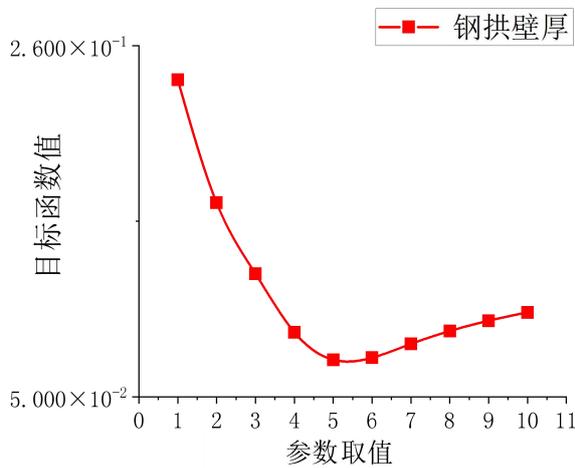
对表 3.1、表 3.2、表 3.3 中的评级为 L0-L2 的不确定参数进行灵敏度分析，参数灵敏度分析在基于经验结合工程实际基础上确定取值范围，取最大值作为上

限，最小值作为下限，对取值范围进行十等均分，以分析目标函数在不确定参数的取值范围内的变化趋势，结果如图 3.6 所示。

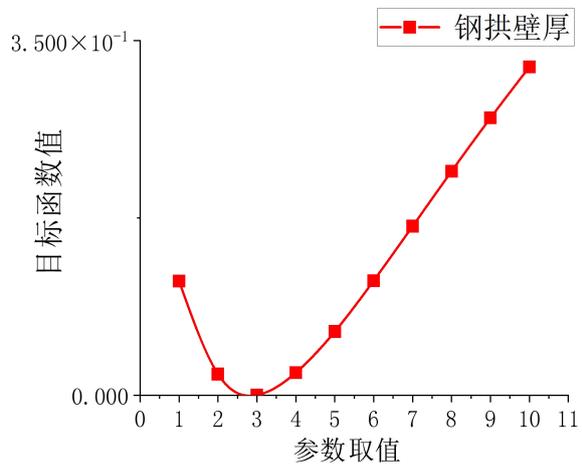


a)静载变形灵敏度分析

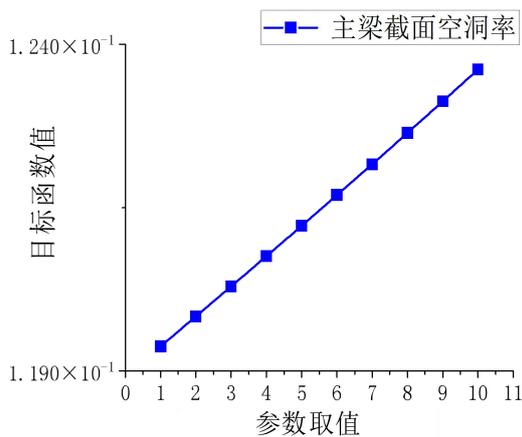
b)模态频率灵敏度分析



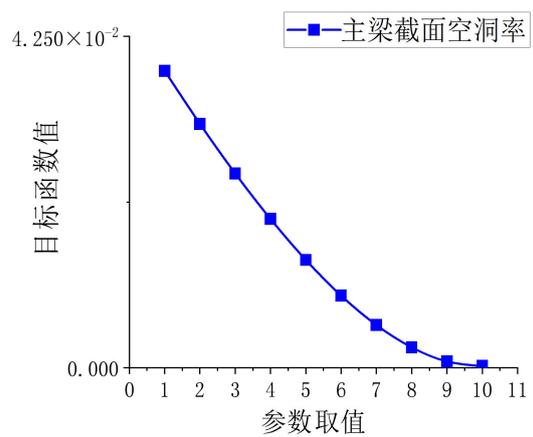
c)钢拱壁厚基于静载变形的灵敏度分析



d)钢拱壁厚基于模态频率的灵敏度分析



e)主梁截面基于静载变形的灵敏度分析



f)主梁截面基于模态频率的灵敏度分析

图 3.6 不确定参数灵敏度分析结果

综合考虑两种目标函数的灵敏度分析结果，可以得到对计算分析结果影响最大的不确定参数是钢拱肋壁厚，其次是主梁截面空洞率、横撑壁厚、桥面混凝土

强度、拉索强度。分析以上结果，桥梁主要受力构件对模型分析结果影响较大，非主要受力构件影响较小，符合桥梁结构分析的基本原则。

### 3.5.3 模型修正

基于模态频率灵敏度分析结果对逆向建立的有限元模型进行修正，将工作模态分析结果得到的前三阶模态频率选为修正参数，通过调整影响最大的 5 个不确定参数的取值确定与工作模态分析结果最为接近的有限元模型，校验结果统计见表 3.7。

表 3.7 基于模态频率的灵敏度分析参数及校验结果

序号	不确定参数	参数设计值	变量下界	变量上界	校验结果
1	桥面混凝土弹性模量 /kN·m <sup>-2</sup>	$3.25 \times 10^7$	$3.00 \times 10^7$	$3.55 \times 10^7$	$3.12 \times 10^7$
2	拉索材料弹性模量 /kN·m <sup>-2</sup>	$2.26 \times 10^8$	$1.95 \times 10^8$	$2.50 \times 10^8$	$2.32 \times 10^8$
3	钢箱拱肋壁厚/mm	20	10	70	20
4	横撑壁厚/mm	20	10	100	30
5	主梁截面空洞率	71%	0%	71%	71%

修正前后的模态频率误差由 2%降低至 1%，校验系数从 0.57-0.79 提升至 0.63-0.81，具体的结果对比如表 3.8 所示：

表 3.8 修正前后结果对比

	一阶频率	二阶频率	三阶频率	校验系数
修正前	0.61	1.01	1.80	0.57-0.79
修正后	0.61	1.01	1.82	0.63-0.81

由以上校验结果可知，修正前后的模型分析结果比较接近。究其原因，基于无人机倾斜摄影技术建立的桥梁有限元模型精度较高，修正前的模型分析结果接近实测结果。

## 3.6 本章小结

本章主要介绍了基于无人机倾斜摄影技术桥梁有限元逆向建模方法，针对飞燕式钢箱拱桥进行了参数分级、参数获取、参数分析等工作，解决了该桥型在有限元逆向建模中的关键问题，基于第二章建立的巴溪洲桥梁实景模型逆向建立了该桥的有限元模型，验证了该有限元模型的计算精度，同时对有限元模型进行了参数分析和模型修正，通过与实桥试验的结果对比，验证了此方法的可行性，为后续此类桥型逆向建模研究积累了经验。

(1) 首先对巴溪洲桥有限元建模过程进行了参数化, 共划分为 49 个参数, 将有限元建模的过程转换为确定参数的过程, 将建模过程参数化可以使逆向建模系统化, 有助于提高桥梁的建模速度和精确度; 同时根据参数来源的可靠性进行了分级, 从 L0-L5 共六个级别, 对参数进行可靠度分级可以量化参数的可靠性, 灵敏度分析可以分析不确定参数对建模结果的影响。

(2) 介绍了非均匀有理 B 样条曲线的基本概念, 使用非均匀有理 B 样条曲线对无人机倾斜摄影模型的复杂曲面进行了拟合, 该方法能有效拟合桥梁复杂曲面, 同时结合了专家先验信息和大数据信息实现了对巴溪洲桥的有限元逆向建模, 有限元模型的校验系数在 0.57-0.79 之间, 模态频率的误差在 2% 以内, 表明该方法建立的桥梁有限元模型可以反映桥梁真实状况。

(3) 介绍了灵敏度分析的基本概念, 基于静载挠度和模态频率对逆向建立的巴溪洲桥有限元模型进行了不可靠灵敏度分析, 分析发现主要受力构件对逆向建立的桥梁有限元模型影响最大, 基于灵敏度分析结果对有限元模型进行了修正, 减少了不可靠参数对模型精度的影响。

## 第 4 章 基于倾斜摄影技术的桥梁挠度测量

### 4.1 引言

桥梁挠度测量对桥梁健康监测具有重要意义，桥梁挠度值是否在合理区间反应了桥梁是否处于安全状态。对于运营时间较长的桥梁挠度测量，传统的非接触式变形监测需要持续的对桥梁进行数据采集，虽然相比传统的测量方法省时省力，但依然还有很大的发展空间和研究空间。针对桥梁长时间跨度挠度测量、温度作用下的周期性挠度测量、桥梁性能评估等桥梁健康监测等研究领域的重要问题，本章提出了一种基于倾斜摄影技术的桥梁挠度测量方法，使用无人机倾斜摄影技术建立桥梁变形前后两期实景模型和点云模型，利用点云模型配准算法将两期桥梁点云模型转换到同一坐标系下，使用点云距离算法计算两期桥梁点云模型中桥梁表面之间的距离值，利用本章提出的改进的基于抽样统计方法的滑动窗口算法提取桥梁变形值和变形曲线，为验证算法的准确性和鲁棒性，开展了室外验证性试验和实桥试验。

### 4.2 点云模型配准

使用倾斜摄影技术对桥梁进行挠度测量时，需要对两期点云数据进行作差计算，要求对两期点云进行严格的配准，使不同坐标系下的两期点云模型转换到同一坐标系中。三维点云配准亦称为三维点云注册 (Registration of 3D Point Cloud)，目的是找到一个三维刚体变换矩阵，使在不同坐标系和不同视角下得到的点云数据可以精确匹配三维坐标，实现由不同数据、不同方法建立的点云模型在空间坐标系中重合<sup>[91,92]</sup>。本研究对点云模型进行配准采用两阶段配准方法，即粗配准和精配准，对桥梁点云模型进行精确配准。

#### 4.2.1 点云粗配准

点云粗配准是对两期任意初始状态的点云进行粗略配准，使得两期点云模型大致对齐，为后续的精配准的变换矩阵提供初始值。粗配准可以有效降低精配准的误差，减少精配准的计算时间。

本研究采用的点云粗配准方法是 4 点全等集配准算法 (4-Points Congruent Sets, 4CPS)，该方法是基于随机采样一致性算法 (Random Sample Consensus, RANSAC) 框架开发的，该方法不约束点云初始位置和姿态，优化全局对应点搜索策略，由 RANSAC 框架中的三组对应点拓展到具有一定约束性的四组对应点集，能有效提高算法的计算效率和鲁棒性。在使用 RANSAC 算法对两个

点云 A 和 B 进行配准时, 通常是从两个点云中分别选取任意不共线的三点作为点集, 通过配准这两个点集计算两个点云的变换矩阵。4CPS 算法的关键是先从点云 A 中选取四个点作为点基 C, 要求这四个点中任意三个点不共线, 再从点云 B 中使用点对间距离和仿射不变形寻找与点基 C 近似对应的所有四点对, 使用最小二乘法计算所有点基对间的误差值, 进而确定最优点基对并计算得到最佳变换矩阵 [93]。

若一个图形具有某种性质, 在平行射影下, 如果这些性质不发生改变, 则称这些性质为仿射不变性。例如, 一个点集中有三个共线的点  $\{a,b,c\}$ , 则这个点集的比率  $r$  为

$$r = \frac{|a-b|}{|a-c|} \quad (4.1)$$

这个点集进行任意的平移或旋转等刚体变换, 比率  $r$  都是不变的, 称这个性质为仿射不变性,  $r$  为仿射不变量。将这个性质应用到三维空间中, 对于从点云 A 中找到的点基 C, 在点云 B 中找到所有与点集 A 近似的点基集合, 称这个集合为全等集合的超集, 将点基 C 和超集中的所有点基的集合进行比较, 找到与公仿射全等的四点集合。

先讨论以上方法应用在二维平面配准中, 再将该方法推广到三维空间点云配准中。假设二维空间中存在四个点  $\{a,b,c,d\}$ , 这四个点在同一平面上, 其中任意三个点不在同一直线上, 将  $a,b$  两点和  $c,d$  两点分别相连, 假设形成的两条直线相交于点  $e$ , 如图 4.1 (a) 所示 [94]:

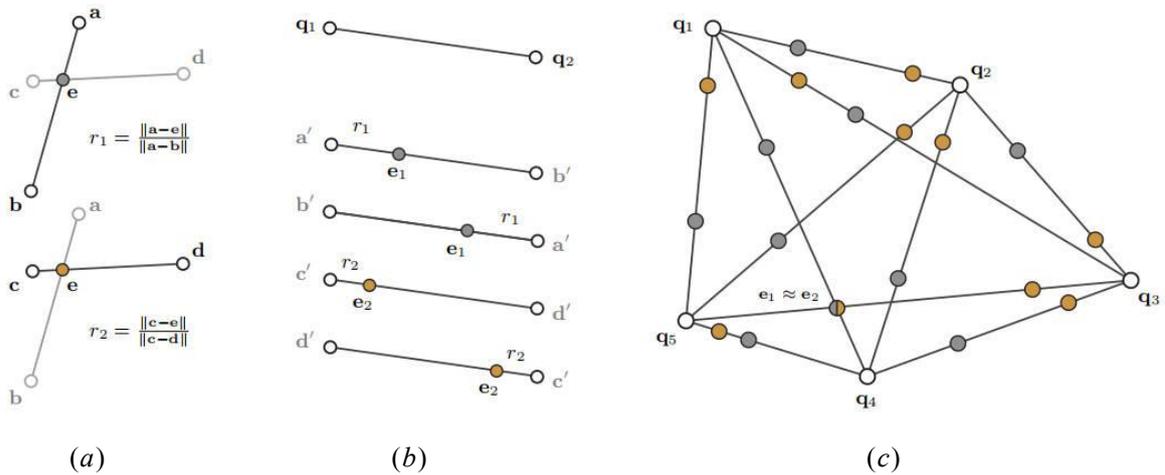


图 4.1 二维配准示意图

则这四个点的对应的比率可以由式 (4.2) 和式 (4.3) 表示:

$$r_1 = \frac{|a-e|}{|a-b|} \quad (4.2)$$

$$r_2 = \frac{|c-e|}{|c-d|} \quad (4.3)$$

这两个比率  $r_1$  和  $r_2$  在任意的刚体变换中都不会改变且具有唯一性，对于目标点云  $B$ ，找到与点云  $A$  中比率为  $r_1$  和  $r_2$  对应点基的所有仿射全等点基，这个过程的时间复杂度为

$$O=(n^2+k) \quad (4.4)$$

式中  $n$  为点云  $B$  中点的个数， $k$  为点基的个数。对于任一点对  $q_1, q_2 \in Q$ ，如图 4.1 (b) 所示，计算出可能存在的所有交点  $e_1$  和  $e_2$ ：

$$e_1 = q_1 + r_1(q_2 - q_1) \quad (4.5)$$

$$e_2 = q_1 + r_2(q_2 - q_1) \quad (4.6)$$

若在点云  $B$  中找到的两组点对相交，并且这些点对的  $e_1$  和  $e_2$  和在点云  $A$  中的值在误差范围内近似相等，则可以认为组成这两组点对的四个点是点基  $C$  对一致的点，如图 4.1 (c) 所示，其中灰色点为  $e_1$ ，黄色点为  $e_2$ ， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别与右侧  $q_5$ 、 $q_3$ 、 $q_4$ 、 $q_1$  对应，4CPS 算法的优点是只需要对选定的点对进行检验，有效提高计算效率。

#### 4.2.2 点云精配准

本研究采用迭代最近点算法 (ICP) 对精细配准两期点云模型，该算法对海量点云数据也具有很好的计算效果，其本质是通过不断对所有的点与点之间进行迭代计算，使用最小二乘法判断误差大小，直到所有的点之间的距离达到规定的误差大小<sup>[93]</sup>。

假设存在两组点云  $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  和  $Q=\{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ 。定义距离函数 (或目标函数)<sup>[95]</sup>：

$$\varepsilon(\alpha) = \sum_{i=1}^k d^2(\alpha(q_i), p_i) \quad (4.7)$$

其中平移矩阵  $\mathbf{T}$  和旋转矩阵  $\mathbf{R}$  构成变换  $\alpha$ 。 $k$  是配准对应点的数量，用  $p_i$  点的拟合曲面  $\Phi p$  表示对应点的信息，如下式所示<sup>[95]</sup>：

$$\varepsilon(\alpha) = \sum_{i=1}^k d^2(\alpha(q_i), p_i) \rightarrow \varepsilon(\alpha) = \sum_{i=1}^k d^2(Rq_i + T, \Phi p) \quad (4.8)$$

旋转矩阵的求解算法有多种，主要包括四元数旋转、矩阵旋转、Euler 旋转等多种方法，目前常用的是基于四元数旋转算法进行求解。

四元数由一个实部和一个虚部构成，如下式所示<sup>[95]</sup>：

$$\lambda = \lambda_0 \cdot 1 + \lambda_1 i + \lambda_2 j + \lambda_3 k \quad (4.9)$$

式中， $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  都是实数， $i, j, k$  为三个虚数单位，并且服从以下运算规律：

$$\begin{cases} ij = k = -ji \\ jk = i = -kj \\ ki = j = -ik \\ i^2 = j^2 = k^2 = -1 \end{cases} \quad (4.10)$$

由上式可以得到，当  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$  时，四元数转换为实数，当  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$  时，四元数转换为复数，因此，四元数也称之为超复数。

当两个点集满足以下两个条件时，即认为点集中的点是相对应的，此时可以采用四元数法：

- 1) 参考点云中点集的容量与目标点云中点集的容量相等，即  $N_p = N_q$
- 2) 参考点云中点集内任意一点都与目标点集中下标一致的点形成一一对应关系。

四元数法是利用最小二乘法的思想寻找平移矩阵  $\mathbf{T}$  和旋转矩阵  $\mathbf{R}$ ，单位四元数为一个矢量  $\bar{q}_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ ，其中  $q_0 \geq 0$ ，且  $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ ，进一步可以推导出旋转矩阵  $\mathbf{R}$ ，如下式所示<sup>[96]</sup>：

$$\begin{bmatrix} q_0^2 + q_0^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 - q_0q_1 \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

假设平移向量为  $\bar{q}_T = [q_4, q_5, q_6]^T$ ，则配置向量为  $\bar{q} = [\bar{q}_R | \bar{q}_T]^T$ ，使用四分数法计算  $F(q) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|q_i - R(q_R)p_i - q_T\|^2$  的最小值来获得最优旋转矩阵和平移向量。

### 4.3 桥梁挠度测量算法

对两期桥梁点云模型进行精配准后，桥梁模型基本对齐，再使用点云之间距离的算法，计算桥梁挠度值<sup>[97]</sup>，目前常用的点云距离计算算法有基于邻近点(C2C)的点云距离算法，基于点到格网(C2M)的点云距离算法，以及基于多尺度模型与模型(M3C2)点云距离算法。

#### 4.3.1 基于邻近点(C2C)的点云距离算法

C2C 方法是计算两期点云之间欧氏距离的一种算法，该算法计算相对简单，快速，不需要对点云进行额外的处理，该算法的核心是计算两期点云模型中最近点距离实现变形计算，对于目标点云中的任意点，在参考点云中搜索与该点最近的点，进而计算其距离<sup>[98]</sup>。

C2C 算法是基于八叉树结构和 Hausdorff 距离算法进行点云距离计算<sup>[99]</sup>。八叉树结构可以实现对点云数据的高效存储，减少计算所需内存，提高邻近点搜索效率。使用八叉树结构对空间进行区域递归划分，将所有点云数据放置在一个空间正方体中，将该正方体划分为 8 个子正方体空间结构，并对子正方体进行不断分割，直到划分层次达到不可再划分的数量层级则停止划分。八叉树原理图如下图所示<sup>[100]</sup>：

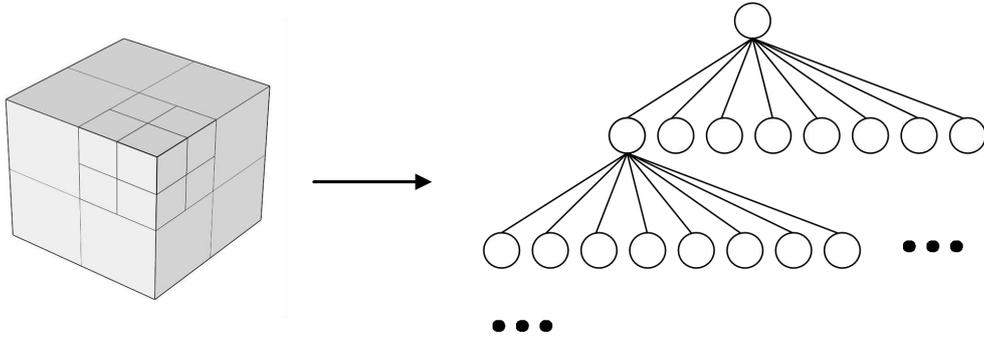


图 4.2 八叉树原理

对两期点云使用相同的八叉树结构进行细分，则这两个八叉树结构内的网格是同源网格，同源网格在空间上的性质是相似的，可以直接对这些网格中的点进行比较。进行比较的算法有很多，最常用的是 Hausdorff 算法，该方法经过验证证明效果较好，本研究基于此算法进行 C2C 点云距离计算。

Hausdorff 距离算法是计算两组空间点集最小距离中最大值，以衡量两个空间点集间的距离大小，其原理如下：假设两个空间点集是同源网格，分别包括点集  $\mathbf{X}=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ， $\mathbf{Y}=\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ ，其中  $\mathbf{X}$  为目标点云， $\mathbf{Y}$  为参考点云，则 Hausdorff 距离如下<sup>[99]</sup>：

$$\text{Dist}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \max \{ \min \text{Dist}(x_i, \mathbf{Y}); x_i \in \mathbf{X} \} \quad (4.12)$$

C2C 算法由于计算原理上的缺陷和不足，导致不能准确计算点云之间的真实距离，其精度也受点云采样密度和表明粗糙度的影响，如下图所示，红色点云为变形后的目标点云，蓝色点云为变形前的参考点云，C2C 算法计算的是图 4.3 中点到点的距离  $L_{C2C}$ ，而物体表面真实的变形为  $L_{True}$ ，从图示可看出，左侧  $L_{C2C}=L_{True}$ ，而右侧由于 C2C 计算原理缺陷导致  $L_{C2C} \neq L_{True}$ 。

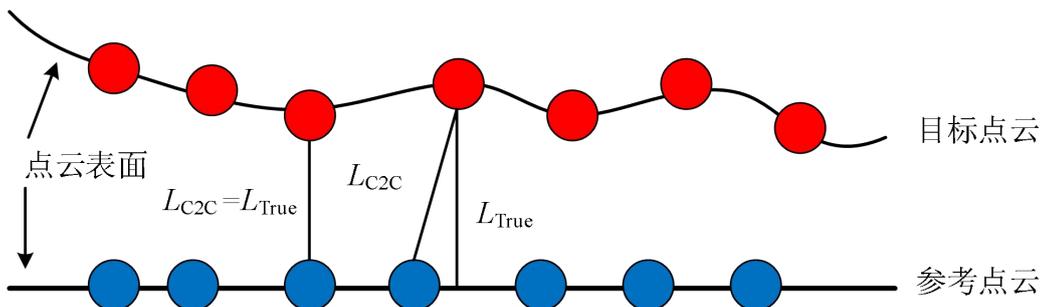


图 4.3 C2C 原理

### 4.3.2 基于点到格网 (C2M) 的点云距离算法

C2M 点云距离算法是在计算点到点的距离的基础上,对参考点云进行平面拟合,计算目标点云到参考点云拟合平面的距离,由于在平面拟合的过程中,消除了部分生成点云时产生的误差,因此这种算法比 C2C 算法具有更高的精度和更加可靠的结果<sup>[101]</sup>。

C2M 算法对参考点云使用 Delaunay 三角化方法进行平面拟合, Delaunay 三角化方法如图 4.4 所示,通过确保任意三个点组成的三角形的外接圆不包含其他点来组成 Delaunay 三角网,利用 Delaunay 三角化方法能对点云模型实现准确的平面拟合<sup>[102]</sup>。

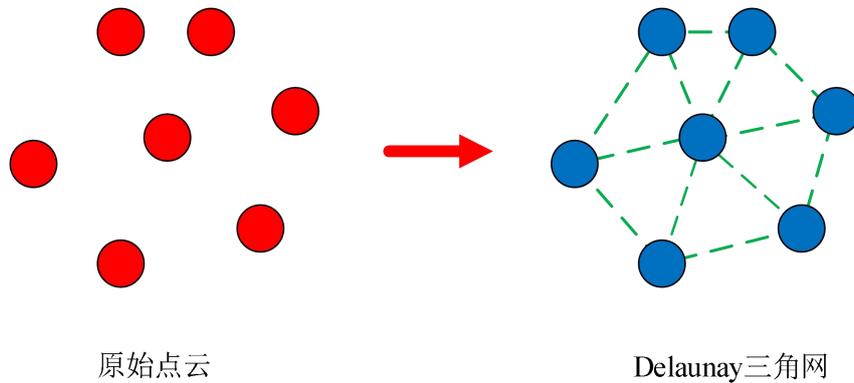


图 4.4 Delaunay 三角网

图 4.5 为点到格网距离算法示意图, C2M 算法可以改善 C2C 算法存在的不足,但是由于 C2M 算法本身的缺陷,计算结果依然会有部分误差<sup>[103]</sup>,如 4.5 左侧,参考点云到目标点云格网之间的距离  $L_{C2M}=L_{True}$ ,而右侧由于 C2M 算法原理缺陷,  $L_{C2M} \neq L_{True}$ 。

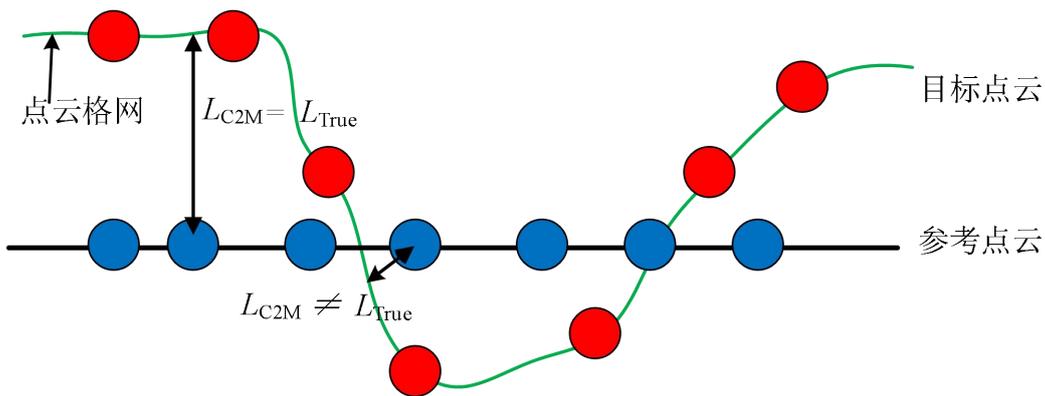


图 4.5 C2M 原理

### 4.3.3 基于多尺度模型与模型 (M3C2) 点云距离算法

由无人机倾斜摄影技术建立的点云模型表面的粗糙度相对三维激光扫描仪的要高,点云模型中点的位置不确定性比较高,使用单个点计算点云距离时,即

使每个点计算正确，但是结果的离散型依然会比较高，难以表征真实的距离，Lague<sup>[104]</sup>提出的 M3C2 算法不再以单个点作为计算依据，而是选取代表点，以代表点为中心选取附近点并拟合平面，计算平面到平面之间的距离，并通过空间置信区间来降低计算的误差，其计算步骤为<sup>[105]</sup>：

1.如图 4.6 (a) 所示，对初始点云模型根据给定的距离进行降采样，得到分布均匀，密度较低的核心点云，并将这些核心点作为后续计算基础的代表点，选取核心点能有效提高计算精度，降低计算复杂度，缩短计算时间。

2.如图 4.6 (b) 所示，对于任意的核心点  $P_{core}$ ，以该点为圆心，以  $D/2$  为半径做圆，将这个  $D/2$  邻域内的所有点进行最小二乘法平面拟合，并计算该平面的局部法向量  $N$ ，同时可以得到该平面内所有的点到拟合平面的标准差大小，并定义该标准差为点云粗糙度  $\sigma(D)$ <sup>[105]</sup>：

$$\sigma(D) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (a_k - \bar{a})^2}{M}} \quad (4.13)$$

式中， $a_k$  为  $D/2$  邻域内第  $k$  个点与拟合平面之间的距离， $\bar{a}$  为  $D/2$  邻域内所有点到拟合平面之间的平均距离， $M$  为  $D/2$  邻域内所有点的总数。

3.如图 4.6 (c) 所示，以核心点  $P_{core}$  为圆心，以  $d/2$  为半径做圆，以拟合平面的法向量  $N$  为轴线做圆柱体，假设圆柱体分别包含了两期点云模型中的点的个数为  $n_1$ 、 $n_2$ ，沿法向量  $N$  的方向分别计算两期点云被圆柱体包含的点的平均位置，假设分别为  $M_1$ 、 $M_2$ ，将两者作差即为 M3C2 计算值  $L_{M3C2}$ ，也即桥梁在该点产生的位移值，对桥梁所有点云进行迭代计算，可以得到整个桥梁的变形情况。这个过程中，投影半径  $d/2$ ，最大计算深度  $H$ （圆柱体高度），法向量半径  $D/2$  三个参数对计算结果影响较大，根据桥梁起伏情况进行合理设置。

4.如图 4.6 (d) 所示，使用空间置信区间方法确定计算结果误差大小，估算计算精度，避免桥梁变形测量误判。假设多次测量的数据服从独立高斯分布，当  $n_1$ 、 $n_2 \geq 30$  时，使用  $z$ -双尾差异显著性检验公式计算满足 95%置信水平的置信区间，即<sup>[105]</sup>：

$$LOD_{95\%}(d) = \pm 1.96 \left( \sqrt{\frac{\sigma_1(d)^2}{n_1} + \frac{\sigma_2(d)^2}{n_2}} + REG \right) \quad (4.14)$$

式中， $n_1$ 、 $n_2$  为两期点云在  $d/2$  投影半径下的核心点个数， $REG$  为点云配准时产生的误差， $LOD_{95\%}(d)$  为  $d/2$  投影半径下且满足 95%置信水平的置信区间内最小变化距离。其中点云配准误差  $REG$  计算公式如下<sup>[105]</sup>：

$$REG = \sqrt{(RMSE_1 + RMSE_2)} \quad (4.15)$$

式中， $RSME_1$  和  $RSME_2$ （Root Mean Squared error, RMSE）分别为参考点云和目标点云的均方根误差。

当  $4 < n_1, n_2 < 30$  时，使用  $t$ -双尾差异显著性检验公式计算满足 95% 置信水平的置信区间，其自由度  $DF$  可由下式表示<sup>[105]</sup>：

$$DF = \left( \frac{\sigma_1(d)^2}{n_1} + \frac{\sigma_2(d)^2}{n_2} \right) / \left( \frac{\sigma_1^4}{n_1^2} / (n_1 - 1) + \frac{\sigma_2^4}{n_2^2} / (n_2 - 1) \right) \quad (4.16)$$

当  $n_1, n_2 \leq 4$  时不需要置信区间。

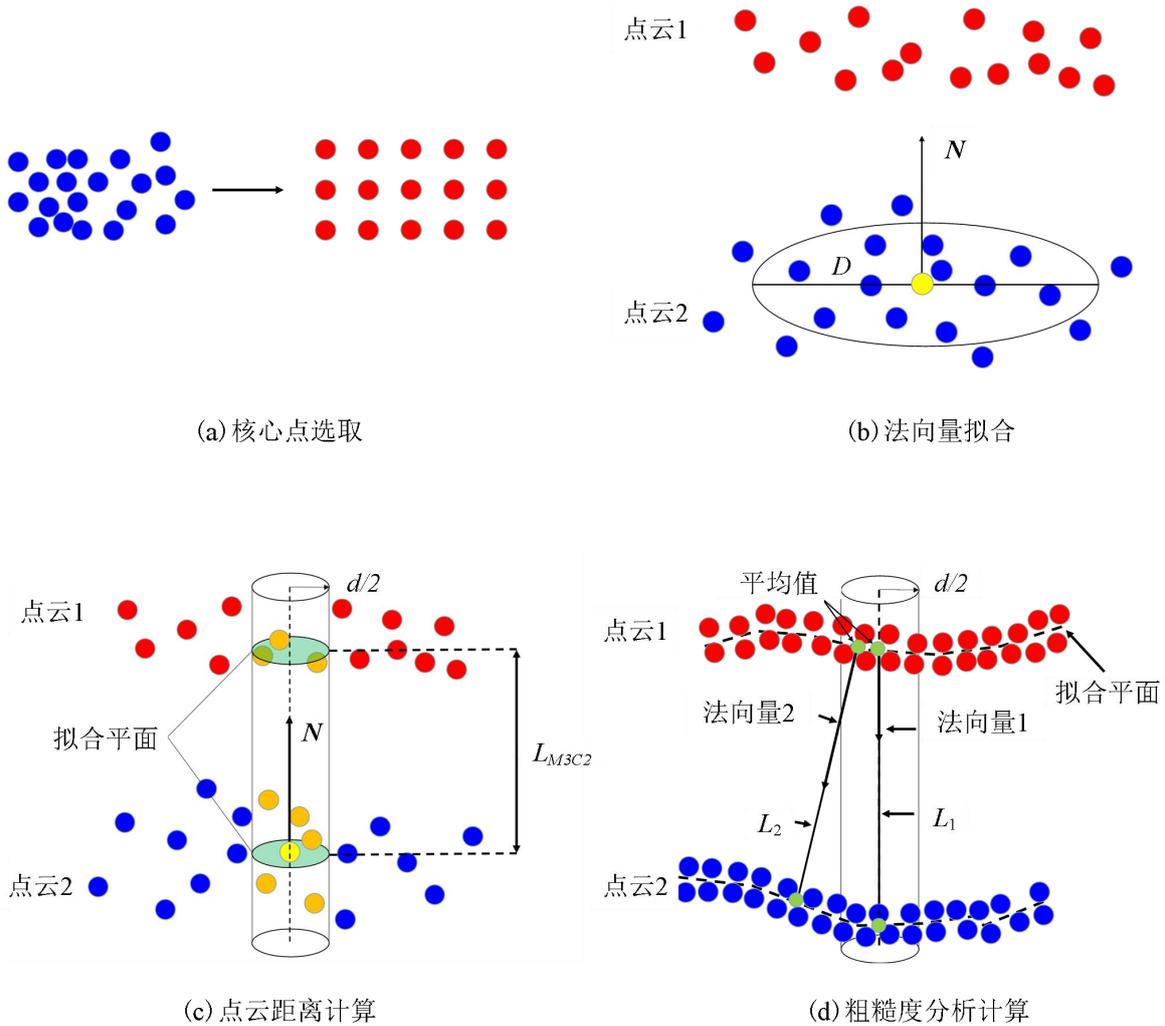


图 4.6 M3C2 原理<sup>[105]</sup>

#### 4.3.4 改进的桥梁挠度提取算法

使用以上任一点云距离算法计算两期桥梁点云模型之间的距离值后，由于点云模型自身的误差和点云表面粗糙度的影响，在桥梁同一个断面的点云，其计算值是各不相同的，此时宜沿该横断面取所有点云的平均值表征该横断面的真实位移值，这样可以有效降低测量误差。本研究采用滑动窗口算法对桥梁表面点云数据进行分析提取，计算桥梁整个纵面的挠度曲线。

#### 4.3.4.1 滑动窗口算法

滑动窗口算法的原理如图 4.7 所示，使用上述点云距离算法计算得到的桥梁点云模型可以视为一个矩阵，其中的点可以视为一个向量，包含了该点的  $x$ ,  $y$ ,  $z$  坐标和点云距离计算值，将该桥梁点云模型视为图 4.7 中的矩形长条，沿桥梁纵向通过确定的窗口进行滑动取值计算<sup>[54]</sup>，选取窗口内的平均位移表征窗口中心位移，窗口的形状可以设置为矩形或者圆形，由于桥梁一般是矩形的，这里本研究也将窗口设置为矩形，给窗口设置阈值限制大小，从而使窗口内的数据进行单独的分析计算，根据窗口阈值和窗口间距的设定，可以将此算法分为两类，如图 4.7 (a) 所示，窗口阈值小于等于窗口中心距时，则窗口之间相邻或相离，窗口之间数据没有重合重复；如图 4.7 (b) 所示，当窗口阈值大于窗口中心距时，窗口之间相交，窗口之间的数据发生重合重复。

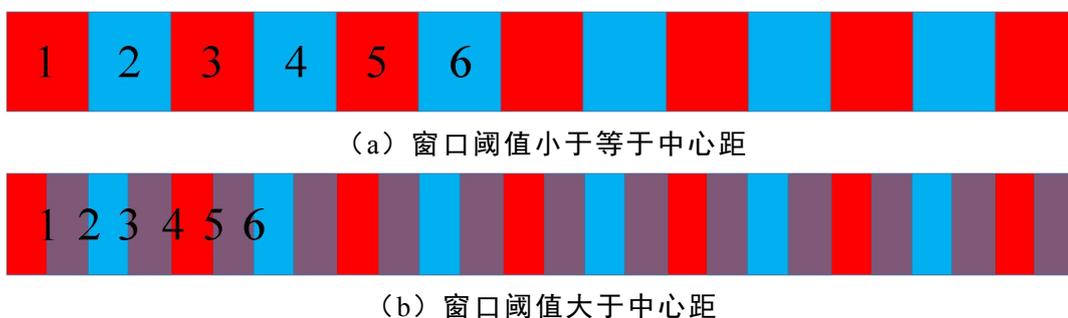


图 4.7 滑动窗口算法原理

本研究的目标桥梁为梁桥，桥梁表面平整光滑连续，4E3A 了减少数据重复带来的误差，对桥梁进行位移提取时，使用图 4.7 (a) 所示的窗口阈值等于中心距的滑动窗口算法对桥梁进行位移计算，具体流程如下：

(1) 使用无人机采集变形前后桥梁多序列影像，利用无人机倾斜摄影技术建立桥梁三维点云模型。

(2) 使用点云切割软件对两期点云模型进行有目的性分割，提取桥梁表面点云模型。

(3) 使用桥梁粗配准方法（4CPS）粗略配准两期桥梁点云，作为精配准的计算初值，进一步使用精配准方法（ICP）精细配准两期桥梁点云模型。

(4) 使用点云距离算法计算已配准的两期点云模型之间的距离。

(5) 确定桥梁点云模型的边界范围，以桥梁一侧边界的  $x$  坐标的平均值作为沿桥梁纵向方向的最小值  $x_{\min}$ ，以桥梁另一侧的边界  $x$  坐标平均值作为最大值  $x_{\max}$ ，确定桥梁的跨长  $L$ 。

(6) 沿桥梁纵向对桥梁表面进行窗口划分，确定窗口间距  $\Delta$  和计算节点位置  $x_i$ ， $x_i$  和  $\Delta$  之间的关系如式 (4.17) 所示：

$$x_i = x_{\min} + \frac{1}{2} \Delta x + \Delta x \cdot i, \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (4.17)$$

(7) 定义桥梁点云模型的所有数据点为集合  $C$ ，在集合  $C$  中满足窗口阈值范围的数据点为集合  $C_i$ ，在 Matlab 的算法程序中，定义集合  $C_i$  为元细胞组， $C_i$  满足下式：

$$C_i = \left\{ x \mid xi - \frac{\Delta}{2} \leq x \leq xi + \frac{\Delta}{2}, i = 1, 2, 3 \dots \right\} \quad (4.18)$$

(8) 搜索元细胞组  $C_i$  中的所有数据点，将  $C_i$  中的数据点平均后表征为相应计算节点的位移计算值  $L$ ，如下式所示，其中  $n$  为元细胞组中  $C_i$  数据点的个数。

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^n L_j}{n} \quad (4.19)$$

(9) 将每个窗口的计算节点提取到的离散的位移值进行连接拟合，得到桥梁位移曲线。

#### 4.3.4.2 改进的滑动窗口算法

利用以上滑动窗口算法提取桥梁位移是比较实用的方法，这个算法中，对位移提取结果影响最大的是窗口间距  $\Delta$ ，窗口间距  $\Delta$  过小，提取的位移结果不具有代表性，窗口间距  $\Delta$  过大，导致位移提取结果误差和离散型会比较大，如何确定一个合理的窗口间距  $\Delta$  是值得研究的一个问题。

本研究针对这个实际问题，提出了一种改进的滑动窗口算法，这个改进的方法是在传统的滑动窗口算法的基础上，利用抽样统计的方法，使用满足 95% 保证率的置信区间确定在窗口间距  $\Delta$  下的位移提取结果的误差大小，通过遍历窗口间距  $\Delta$ ，找到满足最小误差的最优值，这个值即为目标窗口间距  $\Delta_0$ ，该方法可以有效降低位移提取的误差，提高计算精度，计算流程图如图 4.8 所示，具体推导过程如下：

假设两期点云模型中的数据点的  $z$  坐标分别满足独立高斯分布  $X_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ ， $X_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ ，在使用点云距离算法计算桥梁挠度值时，两期点云模型的  $z$  坐标作差得到位移值  $L$ ，此时  $L$  满足以下分布：

$$X_3 = X_2 - X_1 \sim N(\mu_1 - \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2) \quad (4.20)$$

即位移值  $L$  依然满足独立高斯分布。用窗口间距  $\Delta$  内的所有点集的平均值  $\bar{L}$  表征计算节点的实际位移值，则将求解最优平均值  $\bar{L}$  和确定目标窗口间距  $\Delta_0$  的问题转化为在独立高斯分布中分差未知，估计均值的问题。

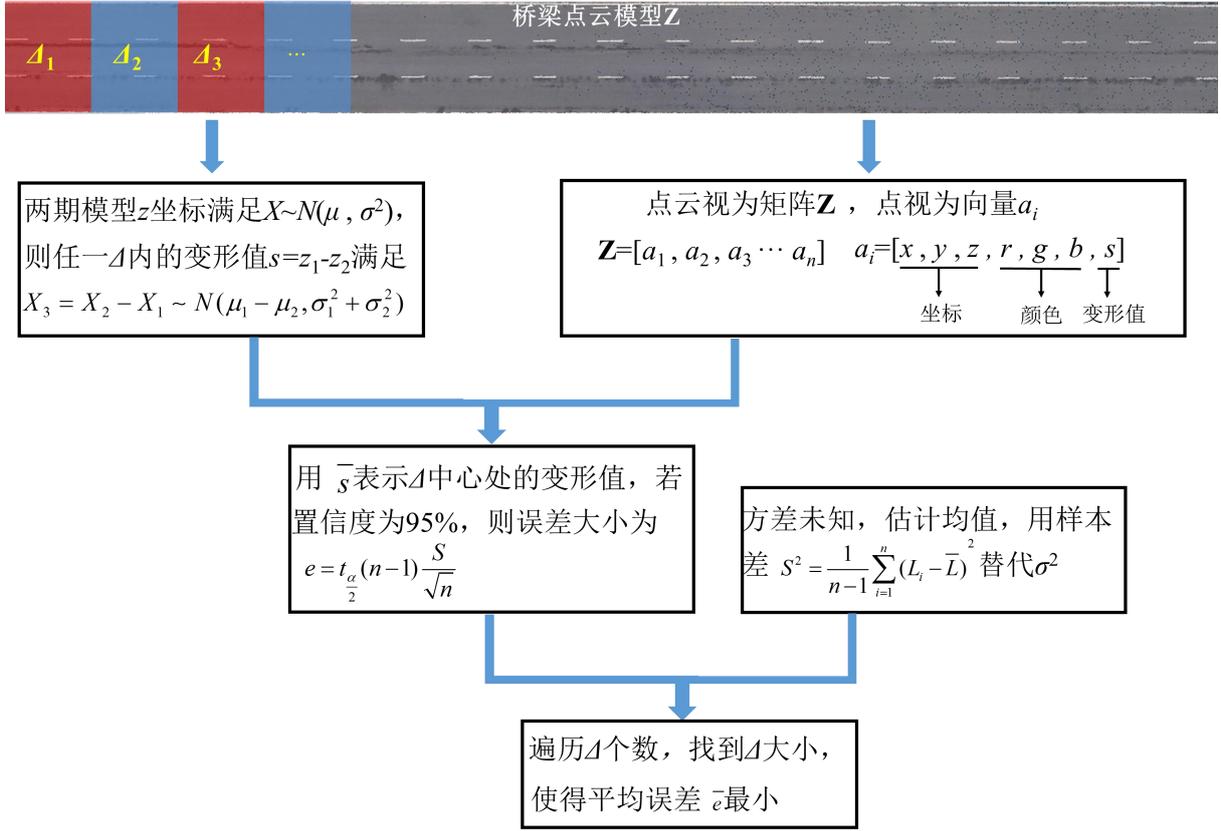


图 4.8 改进的滑动窗口算法计算流程图

设  $\Delta$  为总体  $X_3$  的一个样本, 用样本方差

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2 \quad (4.21)$$

来替代  $\sigma^2$ , 选取样本函数

$$t = \frac{\bar{L} - \mu}{S / \sqrt{n}} \sim t(n-1) \quad (4.22)$$

对于给定的置信度  $1-\alpha$ , 有

$$p(|t| < t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)) = 1 - \alpha \quad (4.23)$$

即:

$$p(-t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) < \frac{\bar{L} - \mu}{S / \sqrt{n}} < t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)) = 1 - \alpha \quad (4.24)$$

可以得到置信度为  $1-\alpha$  的置信区间为

$$\left( \bar{L} - t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{L} + t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (4.25)$$

取  $\alpha = 0.05$ , 即置信度为 95%, 可以得到, 当用均值表征窗口  $\Delta$  内的位移值时, 误差的大小为:

$$e = t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.26)$$

误差  $e$  的大小与窗口  $\Delta$  中所有点的个数  $n$  以及方差的大小  $S$  有关, 假设整个桥梁被划分为  $N$  个窗口, 计算这  $N$  个窗口的误差平均值  $\bar{e}$ , 当  $\bar{e}$  取得最小值时, 此时的窗口间距  $\Delta$  的大小, 即为目标值, 即

$$\bar{e} = \frac{\sum e}{N_{\Delta}} = \bar{e}_{\min} \rightarrow \Delta = \Delta_{\min} \quad (4.27)$$

基于以上改进的滑动窗口算法原理和步骤, 使用 Matlab 软件进行编程解算, 具体的代码详见附录 B。

## 4.4 桥梁挠度测量试验验证

针对以上提出的算法和理论, 本研究分别开展了实验室验证性试验和野外实桥试验, 通过实验室试验可以论证本研究提出的桥梁挠度测量方法的可行性和有效性, 而野外实际情况不如实验室条件那样可控, 误差来源相对较多, 通过野外实桥试验能验证所提方法的鲁棒性, 因此有必要开展实验室验证性试验和野外实桥试验。

### 4.4.1 实验室验证性试验

在实验室可控的条件下, 对试验梁进行全面的数据采集, 包括影像数据采集和位移数据采集, 通过后续试验分析, 本研究提出的桥梁挠度测量方法的可行性和有效性, 验证所提方法的精度, 同时研究多种工况下的计算结果, 为后续野外实桥试验提供参考和指导。

#### 4.4.1.1 实验室验证性试验方案设计

使用 Q235 钢条作为试验梁, 该钢条尺寸为  $1000\text{mm} \times 120\text{mm} \times 1\text{mm}$ , 简支在支座上, 简支于支座的长度为  $200\text{mm}$ , 试验梁有效长度为  $600\text{mm}$ ; 通过加载重物的形式使试验梁产生形变, 重物由四个铁块组成, 共重  $1.52\text{kg}$ , 将重物放置在重物加载篮中对试验梁进行加载, 加载形式为跨中集中加载, 使用加载篮而不直接在试验梁表面进行加载的目的是为了避免从试验梁上方加载时导致重物遮挡试验梁表面, 导致后续建模分析时这部分数据缺少; 使用三个千分表分别记录跨中和  $1/4$  跨处的位移值; 在支座处使用重物压实, 防止支座发生抖动, 试验示意图如图 4.9 所示。

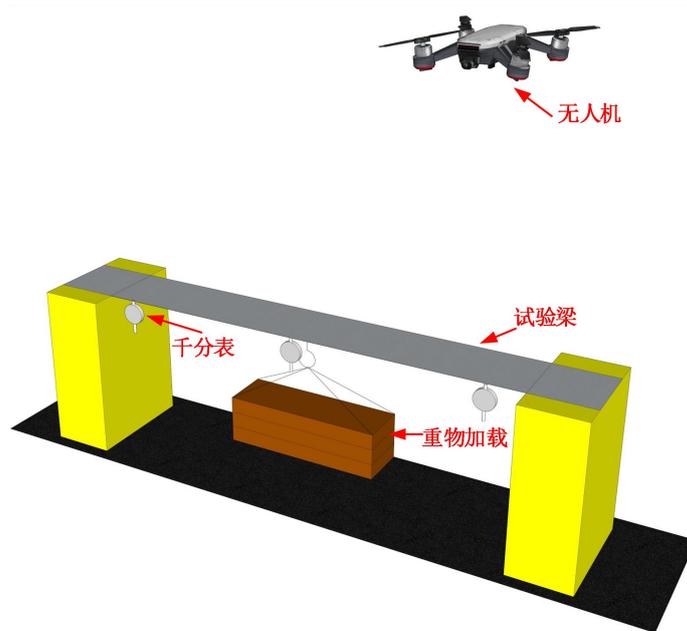


图 4.9 室外验证性试验示意图

在加载前对千分表进行读数，加载后再进行读数，计算差值得到试验梁在集中荷载作用下跨中和 1/4 跨的挠度值，室外验证性试验布置图如图 4.10 所示，结构示意图如图 4.11 所示。定义图中千分表的编号从左至右分别为千分表 1、千分表 2、千分表 3，其坐标分别为-150mm，0mm，150mm，后续基于此定义开展研究。

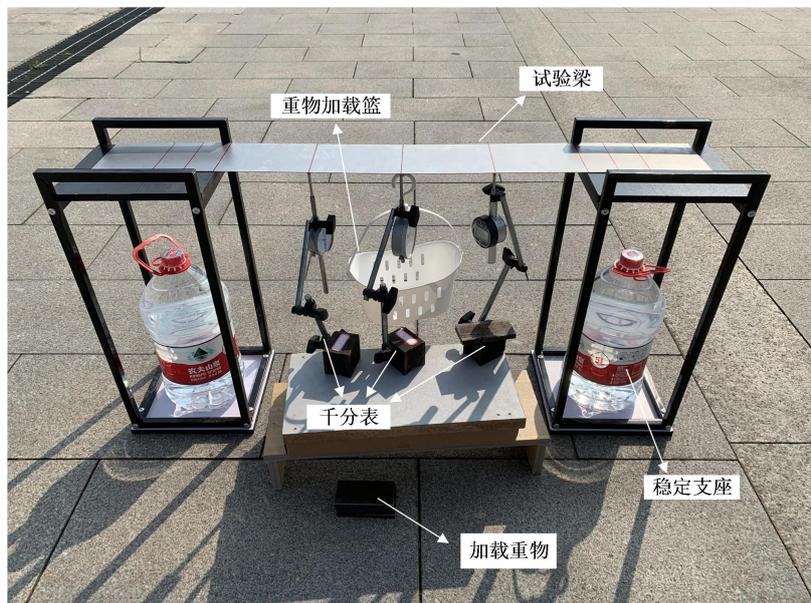


图 4.10 室外验证性试验布置图

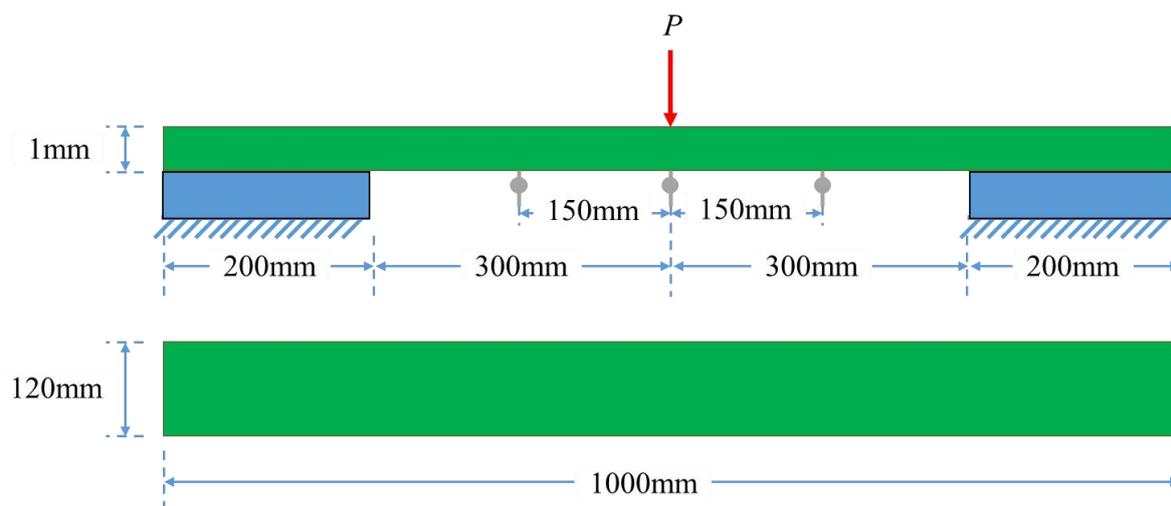


图 4.11 室外验证性试验结构示意图

本次试验采用大疆无人机 DJI 经纬 M300RTK 搭载禅思 L1 云台进行影像数据采集，如图 4.12 所示，经纬 M300RTK 无人机具有能与固定翼无人机相比拟的飞行性能，其飞行速度可达 23m/s，飞行高度可达 7000m，图传距离可达 15km，载重可达 2.7kg，能同时携带多个云台进行影像采集作业，该无人机具有强大视觉系统，具有 24 个传感器，能实现 6 向定位避障，具有网络 RTK 实时差分定位功能，能实时精确获取自身定位，无需额外使用 RTK 布置航测像控点和进行后解算操作。

禅思 L1 是融合激光可见光的云台，集成了 Livox 激光雷达模块、高精度惯导、测绘相机、三轴云台等模块，点云扫描效率可达 240000 点/秒，能实时显示采集的点云数据，测绘相机具有 2000 万像素和 1 英寸的传感器，结合高精度惯导功能可以实时获取准确定位。

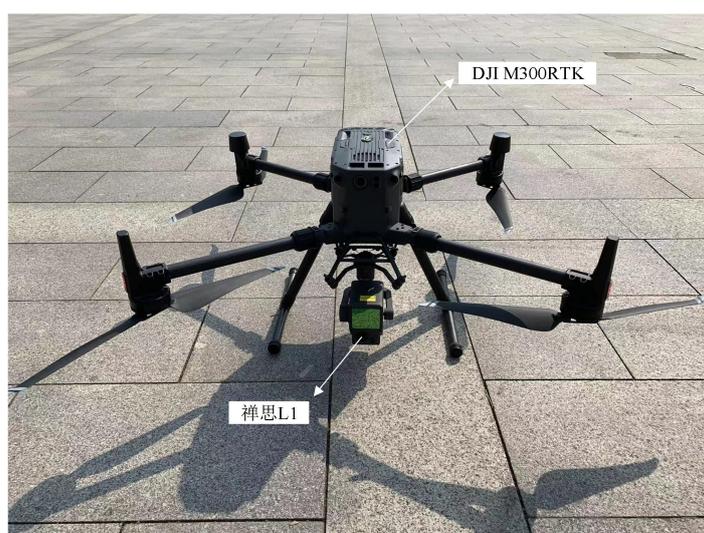


图 4.12 大疆 DJI M300RTK 和禅思 L1

本次试验的实施流程为：

(1) 空载测试：不加载重物，试验梁没有产生变形，读取千分表读数，作为计算初值，使用无人机从 3m 飞行高度对试验梁进行全方位影像采集，由于试验梁尺寸较小，故采用手动飞行的方式进行环绕拍摄。

(2) 加载测试：加载重物，试验梁产生变形，读取千分表读数，减去计算初值得到试验梁产生的位移值，采用上述采集方法分别从 3m、6m、9m、12m、15m 高度对试验梁进行影像数据采集。

#### 4.4.1.2 试验数据处理分析

利用第二章所述倾斜摄影技术，使用 ContxtCapture 软件对采集的影像进行处理，建立试验梁加载前后的三维实景模型和三维点云模型，假设飞行高度为 3m、6m、9m、12m、15m 的试验工况分别为工况 1、工况 2、工况 3、工况 4、工况 5，对工况 1 分别使用 C2C、C2M、M3C2 点云距离算法计算试验梁变形值，利用改进的滑动窗口算法提取挠度曲线，并与实测值进行比较，研究不同算法之间的计算精度差异，得到最优算法；再对工况 1 至工况 5 使用最优算法计算试验梁的挠度值和挠度曲线，研究影像采集高度和测量精度之间的关系，试验梁挠度实测值如表 4.1 所示。

表 4.1 试验梁挠度实测值

千分表编号	1 号千分表	2 号千分表	3 号千分表
千分表位置	150mm	0mm	-150mm
千分表读数	16.993mm	24.934mm	16.982mm

##### 1. 点云配准

对采集的点云模型使用 4.2 节所述原理进行粗配准和精配准，由于试验梁产生了位移，两期点云模型实际上是不重合的，若对两期点云模型直接进行精配准会产生很大的误差，故采用局部配准的方法，切割部分具有明细特征的不动点的点云模型，本研究选取地面为配准模型，首先选取四个分散均匀，特征明显的特征点，采用 4CPS 算法进行粗配准，再对该模型使用 ICP 精配准方法进行精配准，如图 4.13 所示，计算得到配准误差  $RMS=0.005$ ，该部分模型的旋转平移矩阵如下：

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.001 & -1.965 \\ 0 & 1 & 0 & 1.118 \\ -0.001 & 0 & 1 & -0.012 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

再使用该矩阵对试验梁点云模型进行旋转平移，得到具有真实相对空间位置的两期点云模型，配准结果如图 4.14 所示：

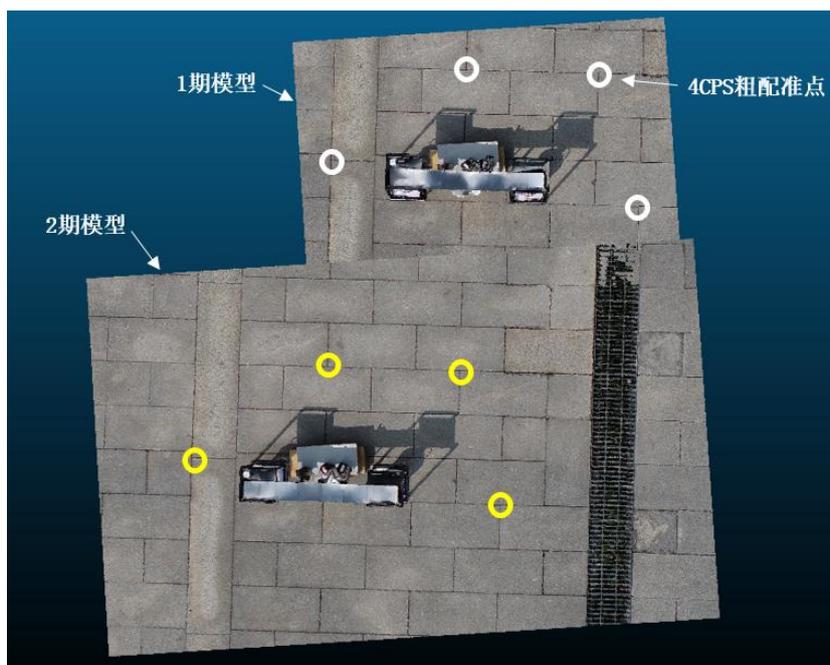


图 4.13 两期点云模型及 4CPS 配准点



图 4.14 点云模型配准结果

## 2. 不同算法之间的分析计算

使用 Cloudcompare 软件对完成配准的两期点云模型使用 4.3 节所述点云位移计算算法（C2C、C2M、M3C2）计算桥梁变形值。

在 C2C 算法中，以变形前的点云模型为参考模型，计算变形后的点云模型到变形前的点云模型距离，设置八叉树级别为缺省，无局部建模，计算结果如图 4.15 所示：

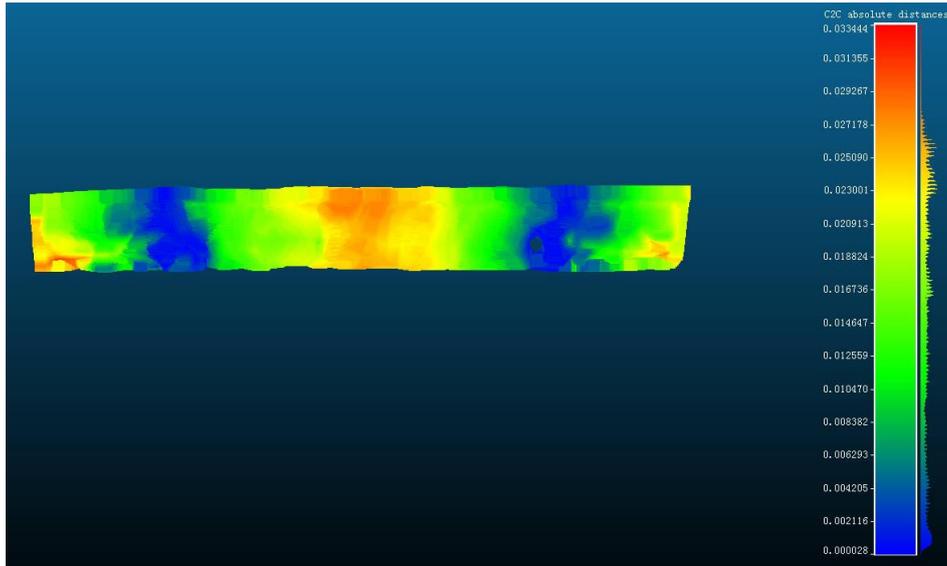


图 4.15 C2C 计算云图

在 C2M 算法中，对变形前的点云模型进行 Delaunay 三角化方法进行平面拟合，平面拟合结果如图 4.16 所示，再计算变形后的点云到拟合平面之间的距离，设置八叉树级别为缺省，无局部建模，计算结果如图 4.17 所示：

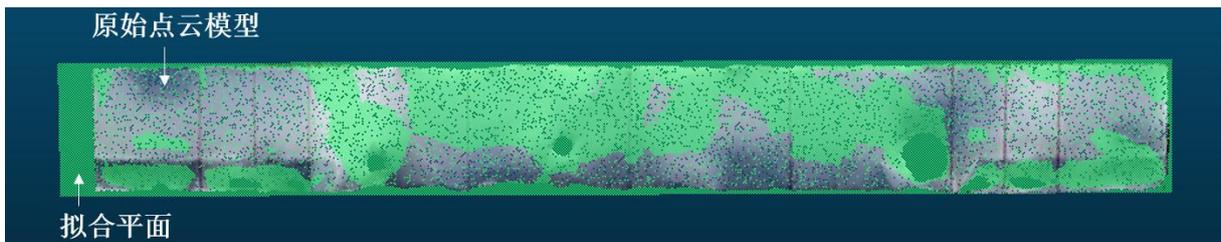


图 4.16 Delaunay 三角化平面拟合

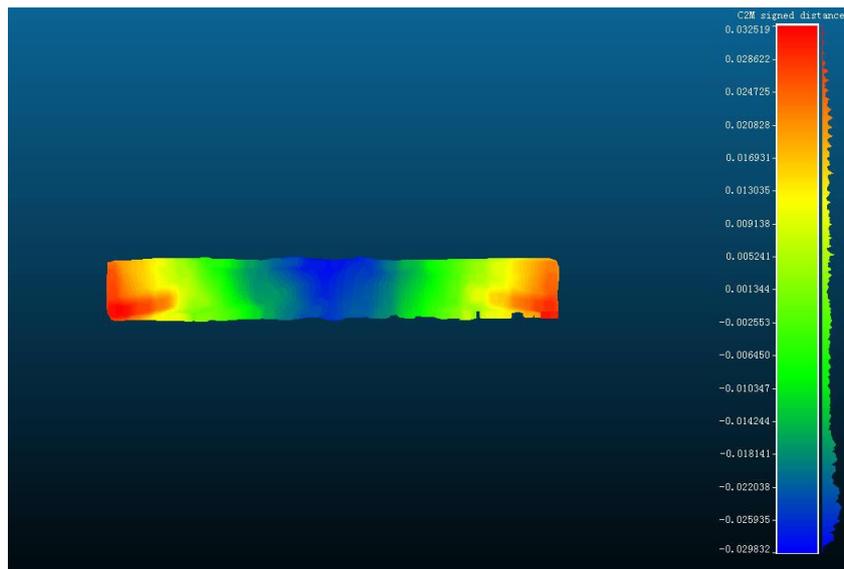


图 4.17 C2M 计算云图

在 M3C2 算法中，计算变形后到变形前的点云距离，设置核心点的间距为 0.01m，圆柱体投影高度为 0.50m，投影半径为 0.09m，计算投影于 Z 方向的位移值，计算结果如图 4.18 所示，

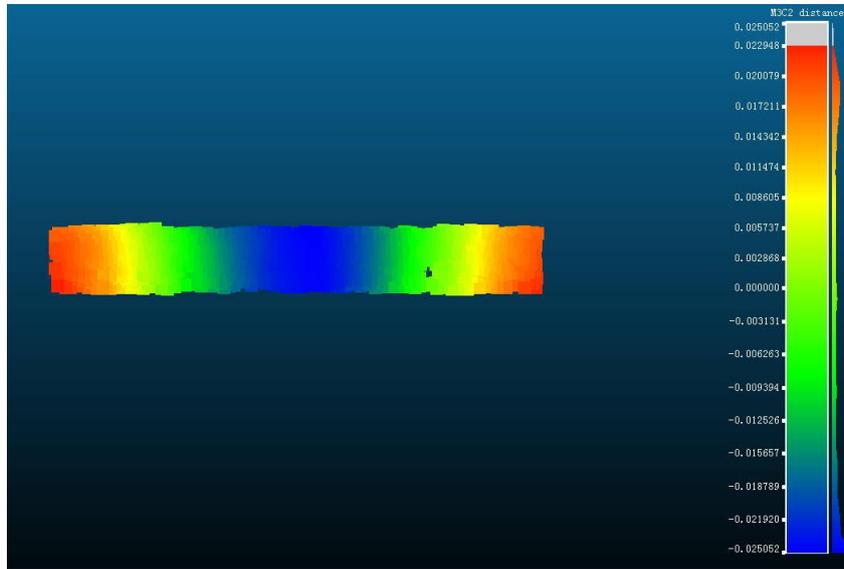


图 4.18 M3C2 计算云图

由于精配准后两期点云模型之间依然会存在误差，为了剔除这部分误差，同时对不动平面（如地面、支座等，本研究对地面进行计算）计算距离值，得到的平均距离值即为配准误差，在试验梁位移值计算中进行剔除。

在得到试验梁变形值后，基于 MATLAB 软件使用 4.3.4 所述改进的基于样本  $t$  分布改进的滑动窗口算法提取桥梁挠度曲线，三种算法计算得到的试验梁挠度曲线如图 4.19 所示，在实测节点处三种算法计算值与实测值的比较如表 4.2 所示：

表 4.2 实测节点处结果对比

千分表编号	1 号 千分表	2 号 千分表	3 号 千分表	误差 平均值	平均 误差率	误差 方差
实测值/mm	16.993	24.934	16.982	-	-	-
C2C 计算值 /mm	17.188	25.940	17.488	-	-	-
C2C 误差值 /mm	0.195	1.006	0.506	0.569	2.90%	0.167
C2M 计算值 /mm	17.584	25.888	17.803	-	-	-
C2M 误差值 /mm	0.591	0.954	0.821	0.789	4.02%	0.034

(续表)

千分表编号	1号 千分表	2号 千分表	3号 千分表	误差 平均值	平均 误差率	误差 方差
M3C2 计算值 /mm	17.675	24.502	16.905	-		-
M3C2 误差值 /mm	0.682	0.432	0.077	0.397	2.07%	0.092

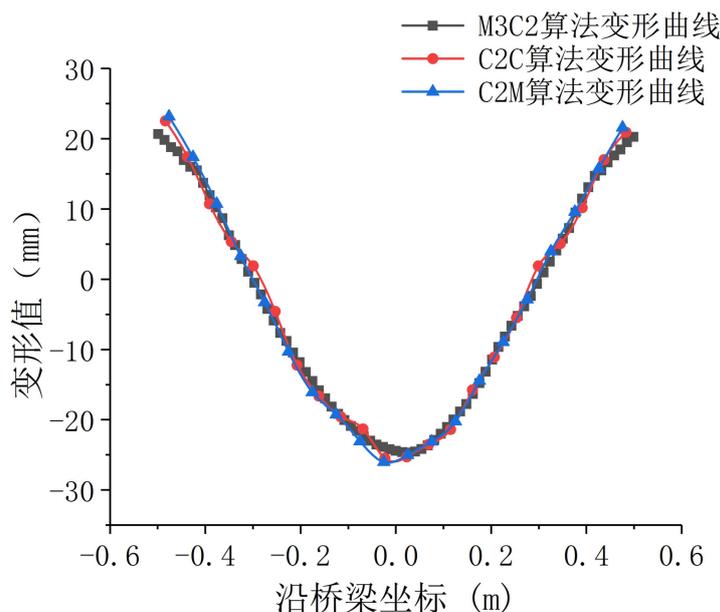


图 4.19 三种算法计算结果对比

由图 4.19 可知，三种算法在计算结果上整体变化趋势上基本一致，在任意  $x$  坐标下的计算值也非常接近；由表 4.2 结果分析可知，从最大误差的角度来看，算法精度排序为 M3C2、C2C、C2M，从平均误差的角度来看，算法精度排序为 M3C2、C2M、C2C，无论从哪个角度看，M3C2 算法都是最优算法，本研究将基于 M3C2 算法开展研究，后续的计算和分析都以 M3C2 算法为计算基础。

对于以上由 M3C2 算法计算得到的结果，使用改进的滑动窗口算法划分的窗口数是 75 个，得到的每个窗口的平均误差是 0.3167mm，变异系数为 4.09%，说明使用改进的滑动窗口算法可以有效拟合桥梁挠度曲线。当窗口间距  $\Delta$  过大时，即划分的窗口数过小时，计算的总体结果不具有代表性，当窗口间距  $\Delta$  过小时，每个窗口的数据将不具有代表性，导致窗口的离散型较大，计算的桥梁挠度曲线偏差也较大，如图 4.20 所示，展示了随着窗口间距  $\Delta$  减小，桥梁挠度曲线离散性不断增加，图 4.20 (a) 中窗口间距  $\Delta=L/75$ ，图 4.20 (b) 中窗口间距  $\Delta=L/150$ ，图 4.20 (c) 中窗口间距  $\Delta=L/300$ ，这里对点云模型散点图进行了处理，其纵坐标单位应为米 (m)。

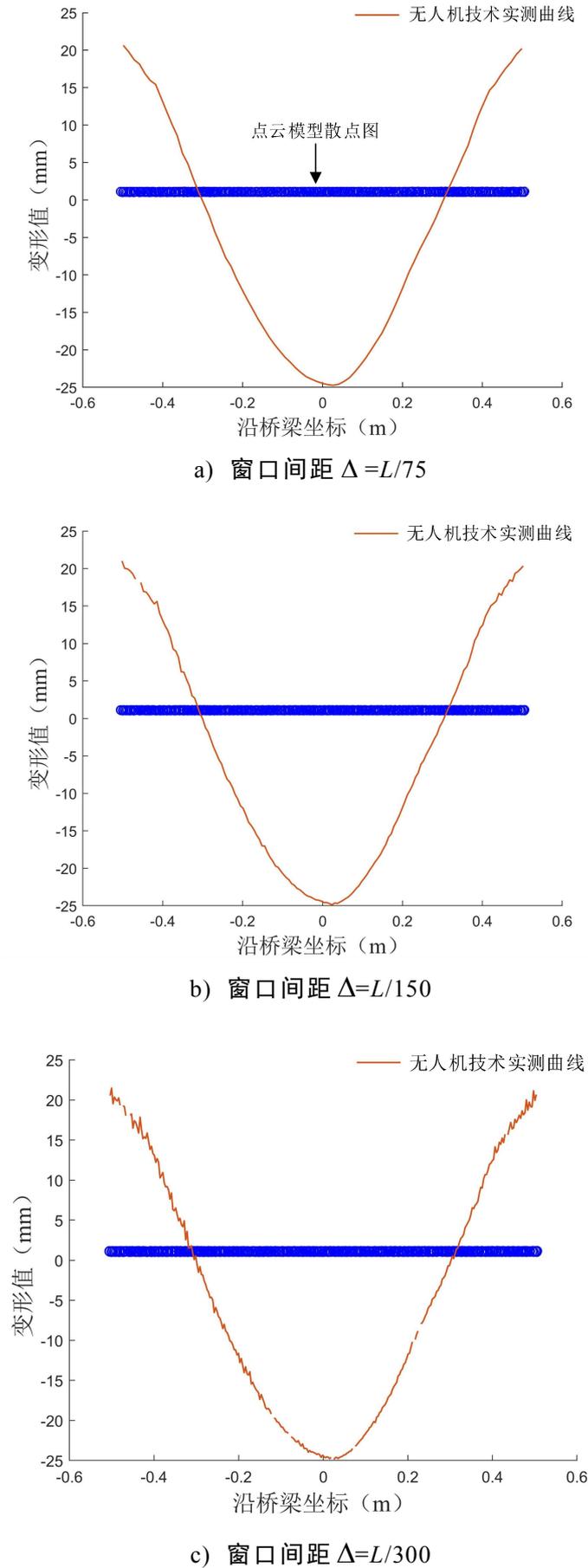


图 4. 20 桥梁挠度曲线离散性变化趋势

### 3. 不同高度之间的分析计算

在本研究采用的无人机的硬件参数条件下，为研究飞行高度对测量精度的影响，对飞行高度分别为 6m、9m、12m、15m 的工况 2-工况 5 使用前述的改进的滑动窗口算法和 M3C2 点云位移算法进行计算，提取试验梁在三个已知点上的位移值和整个试验梁的挠度曲线，并计算每个工况下的测量平均误差，研究飞行高度和测量误差之间的关系，平均误差的计算公式如式（4.29）所示：

$$F(i) = \frac{\sum_{j=1}^3 |L_j - D_j|}{3} \quad (4.29)$$

式中， $i$  为工况编号， $j$  为千分表编号， $L$  为无人机技术测量值， $D$  为千分表实测值。具体的计算结果如表 4.3 所示。

表 4.3 五种工况下测量结果对比

编号	测点位置 (mm)			平均误差 (mm)	平均误差率 (%)
	-150	0	150		
实测	16.982	24.934	16.993	-	-
工况 1	16.905	24.502	17.675	0.397	2.07
工况 2	15.109	23.685	16.121	1.331	7.06
工况 3	13.811	21.484	15.137	2.826	14.48
工况 4	12.075	21.022	13.016	4.265	22.26
工况 5	19.307	30.632	24.037	5.027	26.00

由表 4.3 可知，随着无人机飞行高度的增加，本研究提出的算法测量的平均误差也不断增加，将计算得到的每个工况下的测量平均误差与飞行高度之间的关系绘制在图 4.21 中。

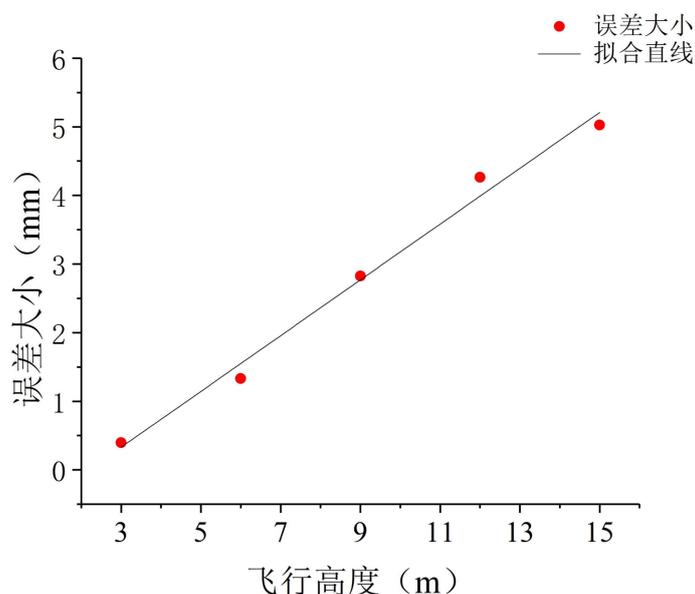


图 4.21 误差比较与直线拟合

由图 4.22 可知，在 15 米高度范围内，误差大小和飞行高度基本成正比关系，拟合的直线方程为：

$$y = 0.4065x - 0.8890 \quad (4.30)$$

#### 4.4.2 室外实桥试验

由以上实验室验证性试验的分析结果可知，本文提出的基于改进的滑动窗口算法和 M3C2 点云变形算法的桥梁挠度曲线提取技术可以在实验室环境中有效提取桥梁的挠度曲线，精度满足要求，证明了该技术的可行性和有效性。为了进一步验证该算法的鲁棒性，利用该技术对长沙市巴溪洲大桥进一步开展实桥试验。

##### 4.4.2.1 试验准备与数据采集

本研究对巴溪洲大桥变形前后两期点云数据进行采集，第一期数据采集时间为 2023 年 3 月 21 号上午，采集时的温度约为 10℃，第二期数据采集时间为 2023 年 5 月 4 日，采集时的温度约为 32℃，在两期数据采集中，温度变化是引起桥梁变形的主要原因，通过对两期点云进行分析计算，提取桥梁挠度曲线，与该桥有限元模型的分析计算结果进行对比，验证本研究提出的算法的有效性和鲁棒性。

2023 年 3 月 21 日采集的桥梁照片和建立的桥梁点云模型分别如图 4.22 (a) 和图 4.23 (a) 所示，2023 年 5 月 4 日采集的桥梁照片和建立的桥梁点云模型分别如图 4.22 (b) 和图 4.23 (b) 所示，两次影像采集的设备均为大疆 M300 RTK 型无人机，该型号无人机具体参数介绍如 4.4.1 节所述，影像采集方法均为 2.4 节所述采集方法，桥梁点云模型建立方法为前述无人机倾斜摄影技术。

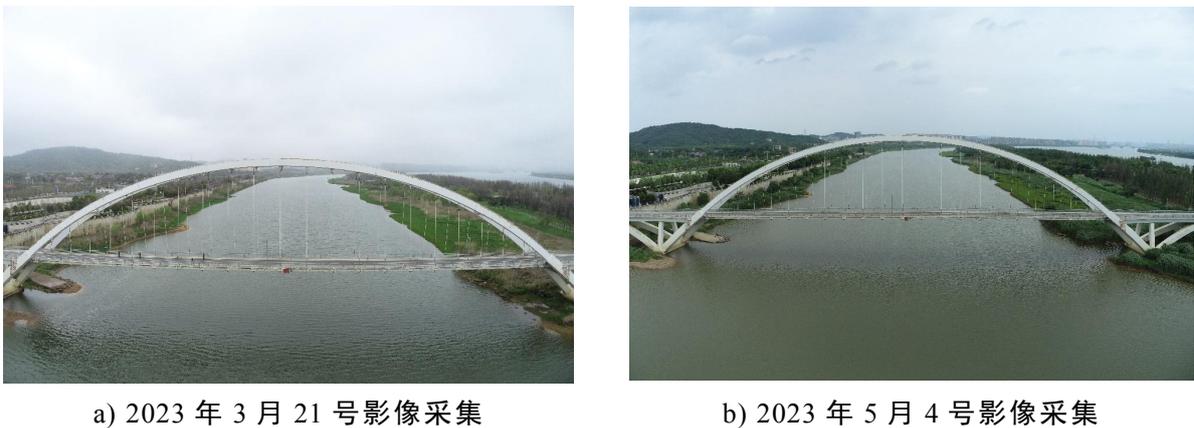


图 4.22 无人机影像采集



a) 2023 年 3 月 21 号采集的桥梁点云模型



b) 2023 年 5 月 4 号采集的桥梁点云模型

图 4.23 初始点云模型

#### 4.4.2.2 试验数据处理分析

##### 1. 点云模型预处理

使用 Cloudcompare 软件对点云进行处理，对初始点云模型进行切割，留下桥面和支座点云模型，如图 4.24 所示。



a) 2023 年 3 月 21 号切割后的桥梁点云模型



b) 2023 年 5 月 4 号切割后的桥梁点云模型

图 4.24 切割后的点云模型

使用 4.2 节所述方法在 Cloudcompare 中进行粗配准和精配准，以支座作为配准对象，计算出转换矩阵之后对桥面进行配准转换，利用 4CPS 算法对支座进行粗配准，再对支座进行精配准，如图 4.25 所示，计算得到的误差  $RMS=0.076$ ，旋转平移矩阵为：

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & -0.001 & -0.001 & -1.136 \\ 0.001 & 1 & 0.003 & 14.954 \\ 0.001 & -0.003 & 1 & 17.547 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

再使用该矩阵对桥面点云模型进行旋转平移，得到具有真实相对空间位置的两期点云模型，配准结果如图 4.26 所示：

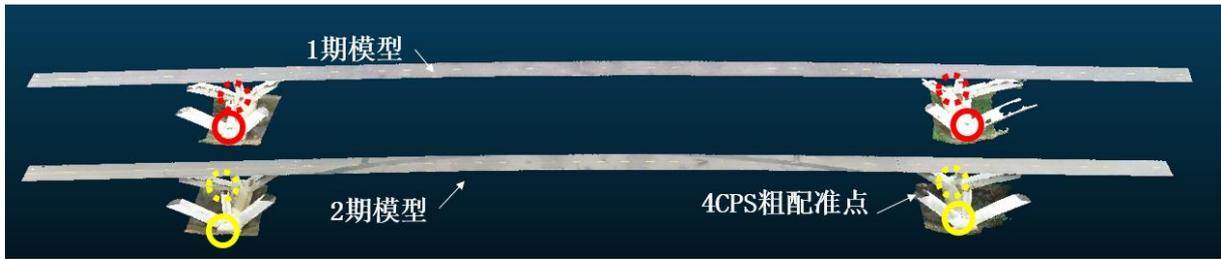


图 4.25 两期点云模型及 4CPS 配准点

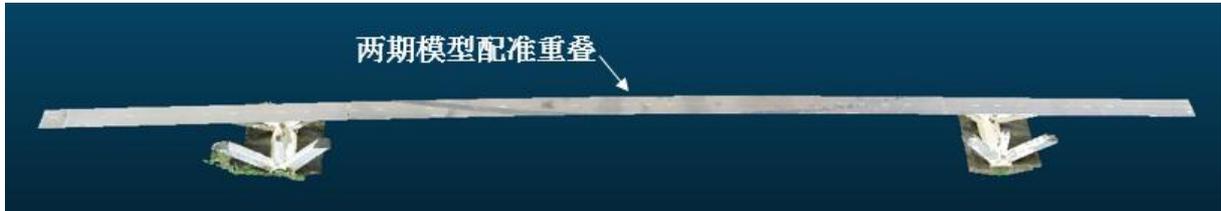


图 4.26 两期点云模型配准结果

## 2. 位移计算与挠度曲线提取

利用 M3C2 算法计算桥梁中部 142m 桥面板的桥梁变形值，设置核心点的间距为 0.01m，圆柱体投影高度为 0.35m，投影直径为 0.01m，计算投影于 Z 方向的位移值，得到 M3C2 计算值。计算结果如图 4.27 所示：

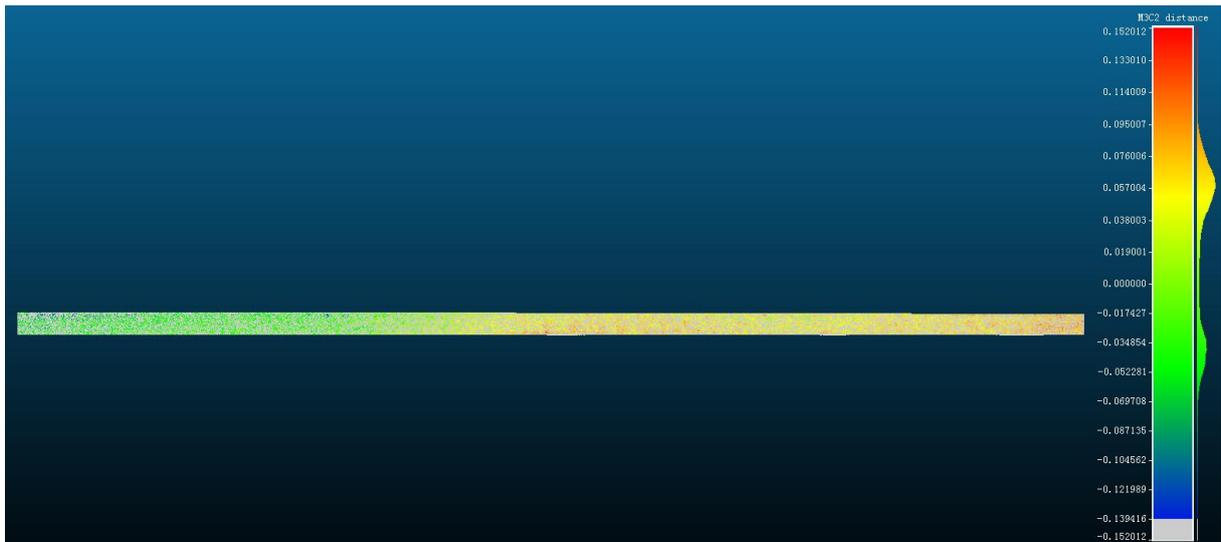


图 4.27 M3C2 计算结果

由于支座配准存在一定的配准误差，两个点云模型不能完全重叠，导致计算结果和实际值存在一定的偏差，因此需要对支座配准误差进行剔除。首先，使用 M3C2 算法计算两个支座处的平均配准误差，其大小分别为 -54.6mm 和 47.1mm，再对全桥进行配准误差线性修正，将得到的 M3C2 距离值减去该处的配准误差，得到真实点云距离值，计算示意图如图 4.28 所示

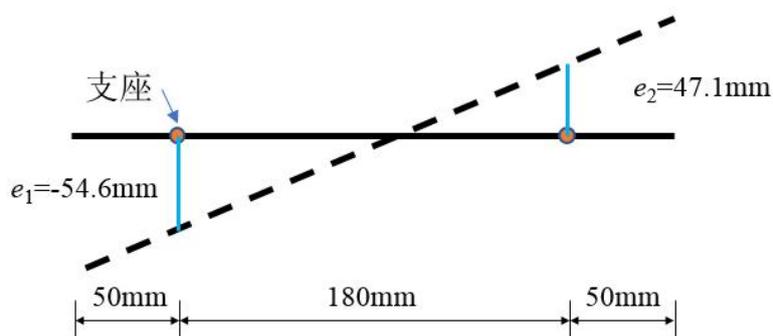


图 4.28 支座配准误差修正示意图

利用 Matlab 软件对修正配准误差后的桥梁点云模型进行计算，提取桥梁中跨横梁的挠度曲线，由于数据点的离散性较大，使用改进的滑动窗口算法进行计算时无法收敛，因此采用常规的方法将数据分为若干等份，计算每一份的点云距离平均值来表征为该处的挠度值，计算结果如图 4.29 所示。由图可知，提取的桥梁挠度曲线离散性较大，这可能是因为在采集影像过程中，车辆荷载引起桥梁发生轻微变形和点云模型噪点较多以及桥梁不均匀温度场导致变形不均匀引起的。利用最小二乘法对提取的桥梁曲线进行二次拟合，降低噪点和误差对变形测量结果的影响，得到拟合后的桥梁挠度曲线，同时对巴溪洲桥的 MIDAS 有限元模型添加整体升温 22 度的温度荷载，得到桥梁中部桥面板由温度引起的位移曲线，由于点云模型配准时是以支座进行配准的，即认为支座是没有发生位移的，故需要将 MIDAS 计算结果中的支座位移剔除掉，将剔除支座后的 MIDAS 计算变形曲线与实测挠度曲线进行对比，如图 4.30 所示。

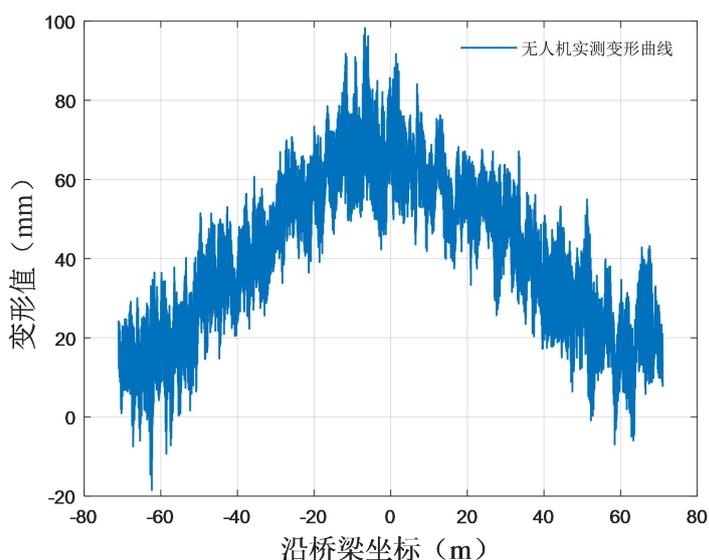


图 4.29 巴溪洲大桥挠度曲线

由图 4.30 可知，利用最小二乘法拟合以降低噪点和误差的桥梁挠度曲线与 MIDAS 分析计算的桥梁变形曲线比较接近，在跨中处的变形误差仅 1.04mm，两

侧误差分别为 2.8mm 和 1.95mm 的。本研究提出的基于无人机倾斜摄影技术的桥梁挠度曲线提取方法具有较好的精度和鲁棒性，能在工程实际中运用。

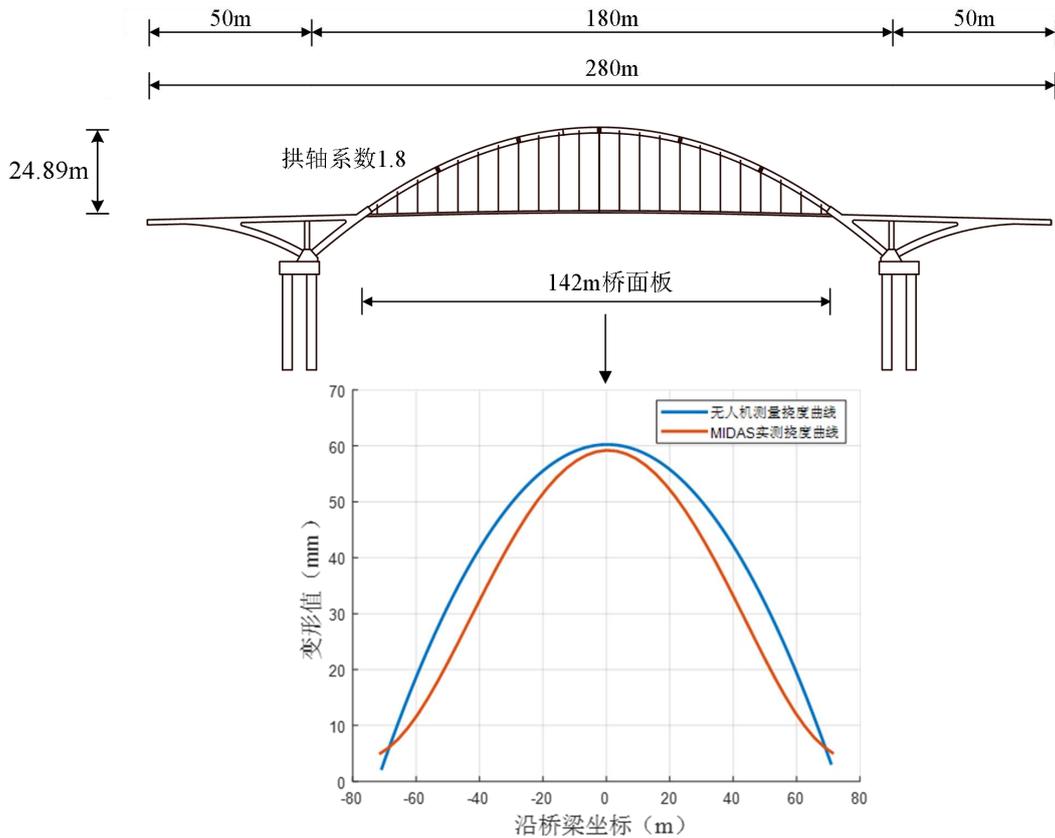


图 4.30 无人机实测和 MIDAS 分析挠度曲线对比

## 4.5 本章小结

本章主要介绍了基于无人机倾斜摄影技术桥梁挠度曲线提取方法，利用第二章所述方法对变形前后的桥梁进行影像采集，并建立桥梁的点云模型，对两期模型进行两阶段配准，再利用 M3C2 算法计算桥梁点云模型产生的位移值，使用改进的基于抽样统计方法的滑动窗口算法准确提取桥梁挠度曲线，通过室外验证性试验和巴溪洲大桥实桥试验验证本研究所提出方法的有效性、准确性和鲁棒性。

(1) 提出的基于抽样统计方法的滑动窗口算法是在传统的滑动窗口算法基础上，利用 95%置信水平的平均值估计对窗口进行划分，该方法能准确识别合理的窗口大小和窗口数量，降低提取的桥梁挠度曲线的离散型和误差大小，提高无人机测量桥梁挠度曲线的准确性。

(2) 进行的室外验证性试验证明了本研究提出的算法能准确提取桥梁挠度曲线，与实测值相比，最大误差仅有 0.682mm，平均误差仅有 0.397mm；证明了在 C2C、C2M、M3C2 点云变形计算算法中，M3C2 算法为最优算法，其计算误差最小；证明了在一定高度范围内，本研究提出的算法的测量误差与无人机影像提取高度成一次正比关系。

(3) 对巴溪洲大桥进行的实桥试验证明了本研究提出的算法能对工程实际桥梁的挠度曲线进行准确识别, 无人机实测的挠度曲线与 MIDAS 分析变形曲线比较接近, 计算误差在 2.8mm, 证明了此算法的有效性和鲁棒性。

## 第 5 章 基于倾斜摄影技术的桥梁线型测量

### 5.1 引言

桥梁线型测量是桥梁健康监测和桥梁施工控制的重要内容，在结构健康领域中，桥梁线型的变化位置 and 变化幅度反映了桥梁是否有损伤以及损伤的位置和幅度，对桥梁进行准确的测量具有重要意义<sup>[106]</sup>。传统的桥梁线型测量使用水准仪人通过工跑尺的方式对桥梁的线型进行测量，这种方式效率低下，浪费人力，还存在交通安全隐患等问题，因此，采用非接触技术对桥梁线型进行快速提取具有重要意义。本研究基于无人机倾斜摄影技术建立桥梁点云模型，分别采用整体最小二乘法、Alpha Shapes 边缘检测算法、改进的滑动窗口算法对桥梁进行线型提取，研究各算法之间的差异，对长沙市梅溪湖大桥开展实桥试验，使用无人机测量的线型与实测线型和设计线型进行对比，比较不同算法的精度和鲁棒性。

### 5.2 桥梁线型提取算法

本研究基于三种算法对桥梁线型进行提取，分别是整体最小二乘法、Alpha Shapes 边缘检测算法、改进的滑动窗口算法，其中改进的滑动窗口算法原理如 4.3.4 章节所述，使用该算法进行桥梁线型提取时，提取的目标值由桥梁点云变形值更改为桥梁点云  $z$  坐标，这里不再赘述其原理，主要介绍整体最小二乘法和 Alpha Shapes 算法。

#### 5.2.1 基于整体最小二乘法进行坐标提取

对于海量桥梁点云数据，很难找到线型测量区域中心点并确定其坐标，本文采用整体最小二乘法对分割后的目标区域进行平面拟合，提取拟合后的中心坐标作为中心点坐标，用中心点表示目标区域的实际高程，提取所有中心点的高程，拟合为桥梁线型曲线。

整体最小二乘法是通过最小化误差平方和寻找数据最佳匹配函数方法，在点云平面拟合过程中保证所有数据点到拟合平面平均距离最小，具体方法如下<sup>[107]</sup>。

点云  $M$  任意一点坐标表示为  $M_i(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, n-1$ 。对于一般线性方程  $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$  将其用矩阵表示为：

$$Ax = L \quad (5.1)$$

改写为：

$$AL[x^T \ -1]^T = 0 \quad (5.2)$$

记增广矩阵  $C = AL$ ，对增广矩阵  $C$  进行奇异值分解：

$$C = U \Sigma V^T \quad (5.3)$$

其中：

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n, \sigma_{n+1}) \quad (5.4)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq \sigma_{n+1} \geq 0$$

则整体最小二乘解可由增广矩阵右奇异向量的最后一列  $V_{n+1}$  得到，即整体最小二乘解为：

$$x = -\frac{1}{V_{n+1,n+1}} [V_{1,n+1} \dots V_{n,n+1}] \quad (5.5)$$

对倾斜摄影技术生成的点云数据进行预处理后使用整体最小二乘法进行点云数据拟合。对数据进行边界拟合后的中心即为目标物表面中心，提取中心点坐标并记录。

### 5.2.2 基于 Alpha Shapes 边缘检测算法进行线型提取

Alpha Shapes 边缘检测算法又称为滚球法，是一种提取点云模型边界的算法，由 Edelsbrunner<sup>[108]</sup>于 1983 年提出，该算法能忽略点云模型边界形状的影响，能够高效准确地提取桥梁点云模型边界。

Alpha Shapes 边缘检测算法的核心思想如图 5.1 所示<sup>[109]</sup>，对于点云  $M$ ，其中包含了  $n$  个点，则这些点可以形成  $n \times (n-1)$  个有向线段，对于任意有向线段的两个端点，以这两个端点做半径为  $\alpha$  的圆，当这个圆内没有包含任何其他点时，则认为这两个端点即为边界点，该线段为边界线段。

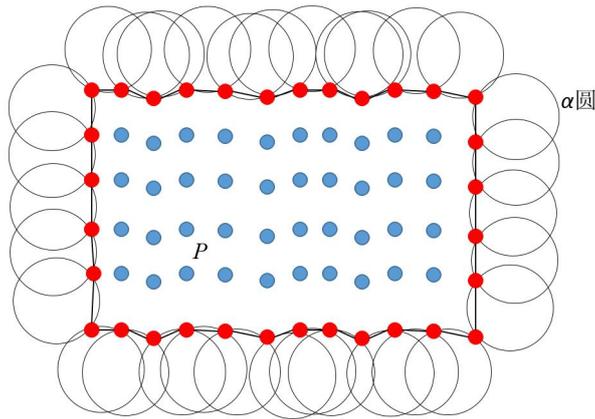


图 5.1 Alpha Shapes 边缘检测算法原理示意图

使用一个半径为  $\alpha$  的圆绕其滚动，当该圆的半径  $\alpha$  足够小时，点云中的所有点均为边界点；当该圆的半径  $\alpha$  足够大时，将不会滚到点云  $M$  的内部，其滚动的路线即为点云  $M$  的边界，边界上的点即为点云  $M$  的边界点；当  $\alpha$  的取值适当时，可以同时提取到点云模型  $M$  的内外边界。

Alpha Shapes 边缘检测算法的具体步骤如下<sup>[55,109]</sup>:

(1) 假设滚动圆的半径为  $\alpha$ ，对于点云模型  $M$  中的任意点  $P(x, y)$ ，搜索  $2\alpha$  邻域内的所有点，记为点集  $R$ ；

(2) 选取点集  $R$  中除  $P$  外的任意点  $P_1(x_1, y_1)$ ，根据点  $P$  和  $P_1$  两点坐标和滚动圆半径  $\alpha$  使用后方距离交汇法计算出滚动圆的圆心坐标，如图 5.2 所示<sup>[55]</sup>；

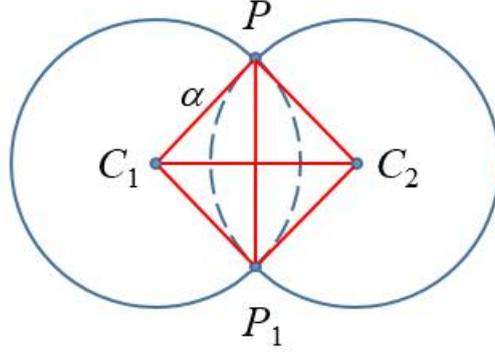


图 5.2 滚动圆计算示意图

其中， $C_1(x_{c1}, y_{c1})$ 、 $C_2(x_{c2}, y_{c2})$  为两种情况下的圆心坐标，其坐标计算公式如下式所示<sup>[55]</sup>：

$$\begin{aligned} x_{c1} &= x + \frac{1}{2}(x_1 - x) - H \times (y_1 - y) \\ y_{c1} &= y + \frac{1}{2}(y_1 - y) - H \times (x - x_1) \\ x_{c2} &= x + \frac{1}{2}(x_1 - x) + H \times (y_1 - y) \\ y_{c2} &= y + \frac{1}{2}(y_1 - y) + H \times (x - x_1) \end{aligned} \quad (5.6)$$

其中

$$H = \sqrt{\frac{\alpha^2}{S^2} - \frac{1}{4}} \quad (5.7)$$

$$S = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (5.8)$$

(3) 计算  $R$  点集中除  $P$ 、 $P_1$  外所有点到  $C_1$ 、 $C_2$  的距离，若所有点到  $C_1$ 、 $C_2$  的距离均大于滚动圆半径  $\alpha$ ，说明滚动圆内不包含任何点， $P$  即为边界点。

(4) 若所有点到  $C_1$ 、 $C_2$  的距离不满足均大于滚动圆半径  $\alpha$  的条件，则遍历  $R$  内所有的点作为  $P_1$ ，若存在某个点满足条件 2 和条件 3，说明该点即为边界点，停止计算，进入下一个点的计算；若所有的点都不满足条件 2 和条件 3，则说明该点不是边界点。

基于 C++ 编程软件中的 PCL (Point Cloud Library) 点云处理库对以上 Alpha Shapes 算法进行编程，作为后续计算的基础。

基于第二章影像采集方法和倾斜摄影技术原理建立桥梁点云模型，切割点云模型桥面板，对于切割好后的桥梁点云模型，使用 Alpha Shapes 边缘检测算法提取桥梁点云模型投影于桥梁纵向的边界点云，对边界点云进行曲线拟合，拟合好后的曲线即为桥梁线型。

### 5.3 梅溪湖大桥线型测量试验

#### 5.3.1 工程概况

梅溪湖大桥桥梁位于长沙市湘江新区，桥梁全长 432m，全桥桥面宽 29.5m，跨孔布置： $3 \times 30\text{m}$ （北引桥）+  $(73+106+73)\text{m}$ （主桥）+  $3 \times 30\text{m}$ （南引桥），主桥和引桥均为预应力混凝土箱梁结构。主桥上部结构采用预应力混凝土连续刚构，直腹板单箱单室截面。中支点处梁高 665cm，高跨比 1/15.9，跨中和边支点处梁高 265cm，高跨比 1/40。主桥 4、5 号桥墩采用双薄壁墩，墩底尺寸  $7.64 \times 2.14\text{m}$ ，墩顶尺寸  $7.64 \times 6.62\text{m}$ 。该桥梁结构布置图如图 5.3 所示。本研究团队于 2022 年 6 月对该桥进行了动力试验、线型测量及外观检查<sup>[110]</sup>。

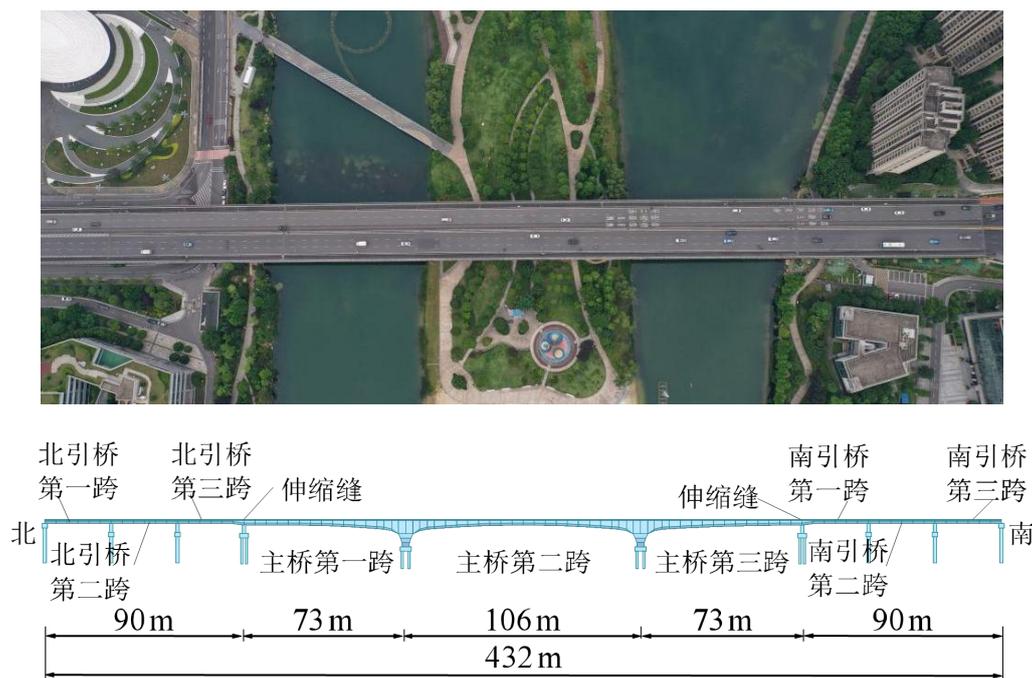


图 5.3 梅溪湖大桥结构示意图

#### 5.3.2 数据采集

##### 1. 人工数据采集

本次检测采用水准仪、塔尺对桥面线型进行测量。将梅溪湖大桥主桥按照主跨 8 等分点，边跨和引桥 4 等分点布置测试断面，在车行道上、下游边缘线 2 条线上分别布设观测点如图 5.4 所示，现场测试照片如图 5.5 所示。

测量方法使用人工跑尺的方式进行测量，在桥梁东侧和西侧分别使用普通水

准测量方法人工测量桥梁线型，并保证闭合差满足规范《工程测量标准》（GB 50026-2020）要求。

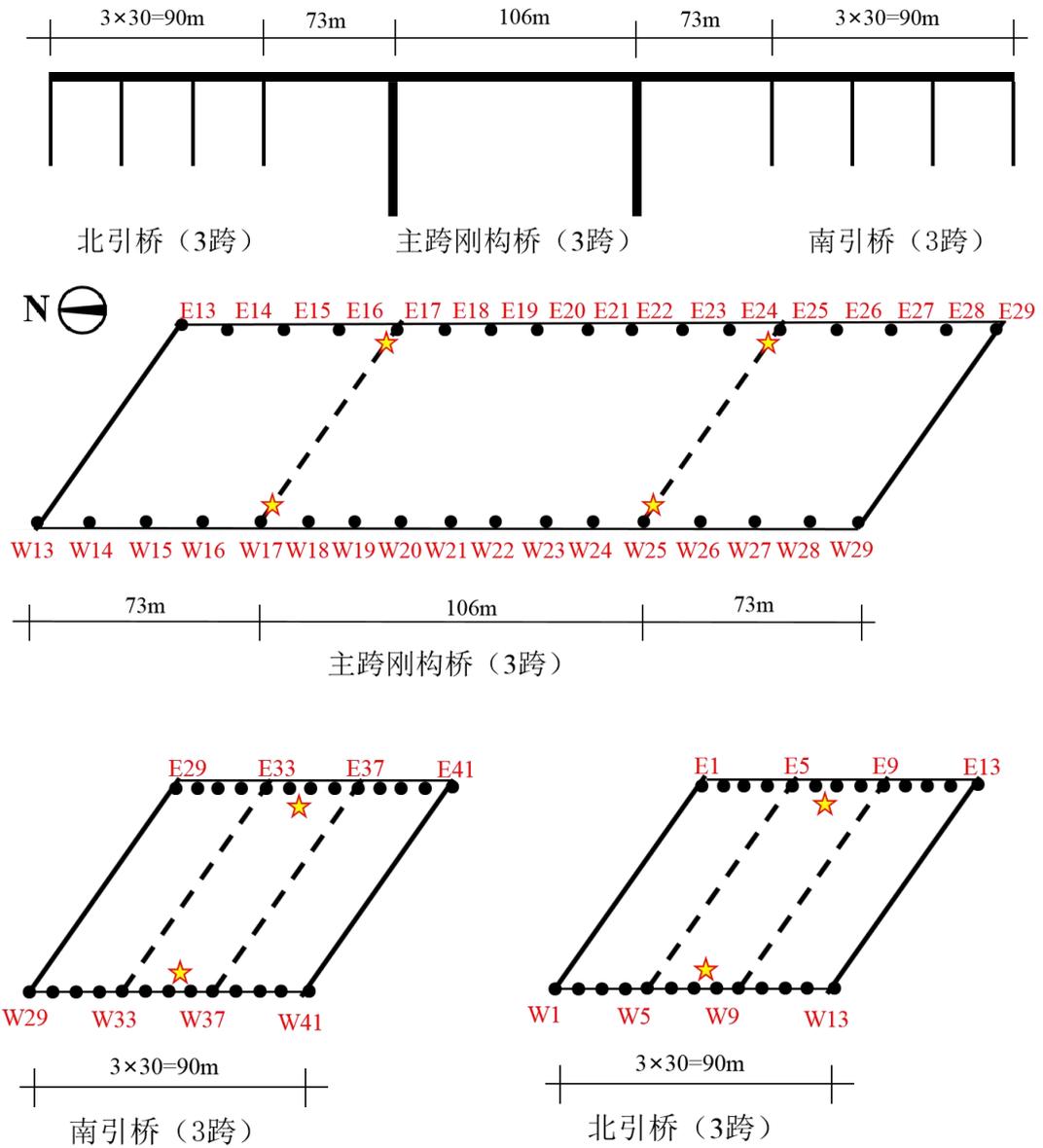


图 5.4 桥面线型测点布置示意图



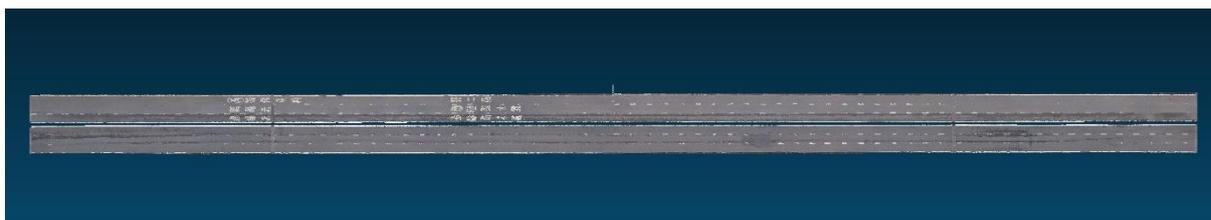
图 5.5 桥面线型测试测站设置及跑尺照片

## 2. 无人机数据采集

使用大疆 DJI Mavic2 型无人机进行影像采集，该无人机的具体参数如 2.5 节所述，基于第二章所述影像采集方法对桥梁进行影像采集，基于第二章所述倾斜摄影原理建立桥梁三维实景模型和点云模型，如图 5.6 所示。



a) 梅溪湖桥三维实景模型



b) 梅溪湖桥点云模型

图 5.6 梅溪湖桥模型图片

对桥梁上具有显著性特征的盲道和伸缩缝宽度及 3 处车行道与人行道的高度差进行了实测（图 4）。以盲道  $X$  向（桥梁横向）和伸缩缝  $Y$  向（桥梁纵向）长度误差表征模型  $X$  向和  $Y$  向精度，以车行道与人行道高度差表征模型  $Z$  向精度。 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向及三维精度计算公式如式（2.17）和式（2.18）所示，

相应的计算结果如表 5.1 所示， $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  向及三维误差较小，三维实景模型的精度和云台精度，飞行高度、光照条件等密切相关，模型精度满足要求。

表 5.1 现场实测值与误差大小

	$X$ 向/mm		$Y$ 向/mm		$Z$ 向/mm		三维/mm
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	
桥北侧	508	495	798	783	215	206	
桥中	498	490	946	933	212	205	-
桥南侧	495	489	662	653	255	247	
均方根误差	9.47		12.58		8.04		17.68
误差率	1.89%		1.57%		3.54%		1.82%

### 5.3.3 桥梁线型提取分析

#### 5.3.3.1 人工测量桥梁线型结果

人工使用水准仪测量的桥梁线型结果与桥梁设计线型的比较如表 5.2-5.4 所示，其中表 5.2 为主桥桥面线型测量结果，表 5.3 和表 5.4 分别为北引桥和南引桥的线型测量结果。

表 5.2 主桥线型测量结果（单位：m）

测点编号	桥面设计 相对高程	桥面实测 相对高程	相对高程 之差	测点编号	桥面设计 相对高程	桥面实测 相对高程	相对高程 之差
W13	-1.875	-1.801	0.075	E13	-1.875	-1.825	0.050
W14	-	-1.360	-	E14	-	-1.404	-
W15	-	-0.987	-	E15	-	-0.998	-
W16	-	-0.505	-	E16	-	-0.538	-
W17	0.000	-0.020	0.020	E17	0.000	0.003	0.003
W18	-	0.333	-	E18	-	0.304	-
W19	-	0.594	-	E19	-	0.533	-
W20	-	0.724	-	E20	-	0.643	-
W21	0.650	0.749	0.098	E21	0.65	0.712	0.062
W22	-	0.652	-	E22	-	0.665	-
W23	-	0.534	-	E23	-	0.524	-
W24	-	0.307	-	E24	-	0.248	-
W25	0.000	0.021	0.021	E25	0.000	-0.003	0.003
W26	-	-0.496	-	E26	-	-0.474	-
W27	-	-0.952	-	E27	-	-0.910	-
W28	-	-1.378	-	E28	-	-1.338	-
W29	-1.875	-1.833	0.043	E29	-1.875	-1.754	0.121

表 5.3 北引桥线型测量结果（单位：m）

测点编号	桥面设计 相对高程	桥面实测 相对高程	相对高程 之差	测点编号	桥面设计 相对高程	桥面实测 相对高程	相对高程 之差
W1	-4.125	-4.001	0.124	E1	-4.125	-4.023	0.102
W2	-	-3.867	-	E2	-	-3.876	-
W3	-	-3.686	-	E3	-	-3.703	-
W4	-	-3.490	-	E4	-	-3.501	-
W5	-3.375	-3.318	0.058	E5	-3.375	-3.314	0.061

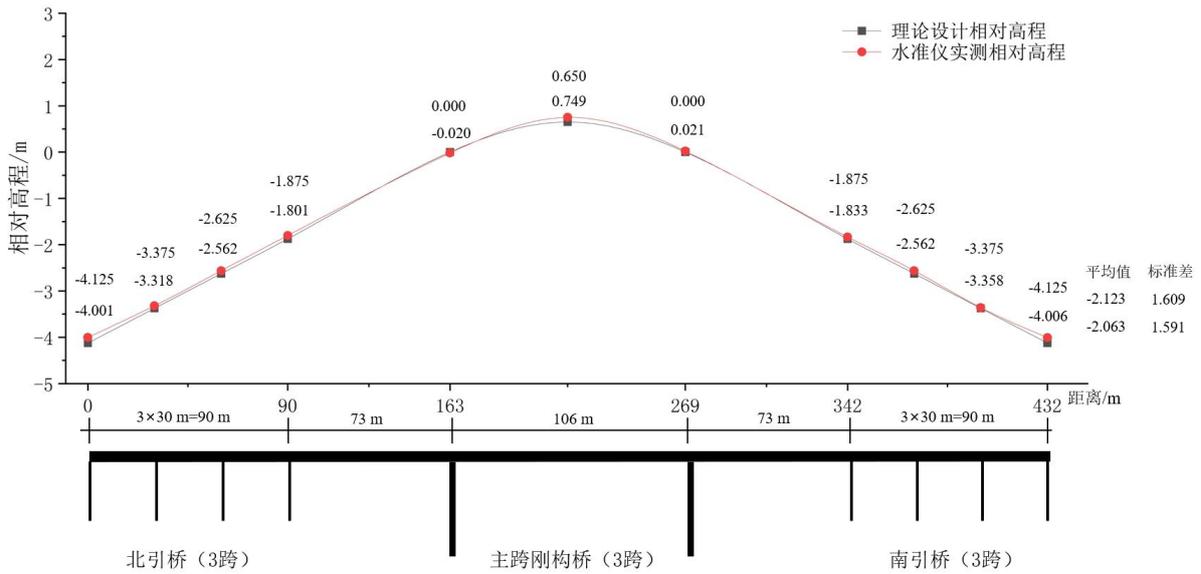
(续表)

测点编号	桥面设计 相对高程	桥面实测 相对高程	相对高程 之差	测点编号	桥面设计 相对高程	桥面实测 相对高程	相对高程 之差
W6	-	-3.140	-	E6	-	-3.155	-
W7	-	-2.920	-	E7	-	-2.959	-
W8	-	-2.742	-	E8	-	-2.769	-
W9	-2.625	-2.562	0.064	E9	-2.625	-2.590	0.035
W10	-	-2.380	-	E10	-	-2.387	-
W11	-	-2.180	-	E11	-	-2.224	-
W12	-	-1.995	-	E12	-	-2.032	-

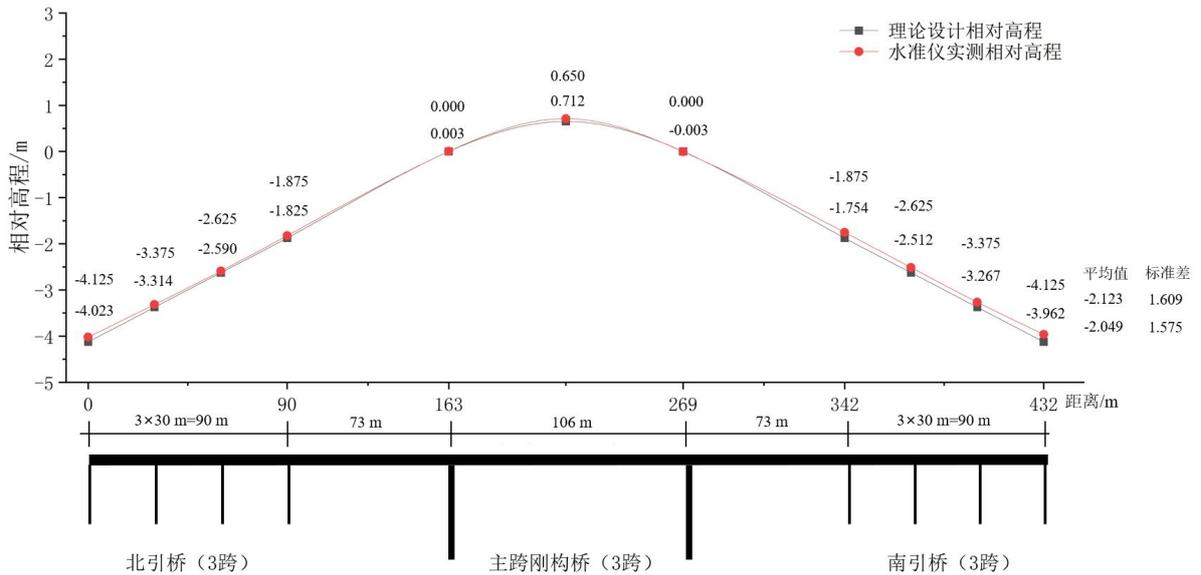
表 5.4 南引桥线型测量结果 (单位: m)

测点编号	桥面设计 相对高程	桥面实测 相对高程	相对高程 之差	测点编号	桥面设计 相对高程	桥面实测 相对高程	相对高程 之差
W30	-	-2.020	-	E30	-	-1.946	-
W31	-	-2.218	-	E31	-	-2.148	-
W32	-	-2.390	-	E32	-	-2.336	-
W33	-2.625	-2.562	0.064	E33	-2.625	-2.512	0.113
W34	-	-2.754	-	E34	-	-2.693	-
W35	-	-2.952	-	E35	-	-2.887	-
W36	-	-3.141	-	E36	-	-3.085	-
W37	-3.375	-3.358	0.017	E37	-3.375	-3.267	0.108
W38	-	-3.545	-	E38	-	-3.455	-
W39	-	-3.723	-	E39	-	-3.641	-
W40	-	-3.892	-	E40	-	-3.834	-
W41	-4.125	-4.006	0.119	E41	-4.125	-3.962	0.163

将桥梁设计线型与实测线型绘制在图中进行对比,如图 5.7 所示。水准测量与设计线型相对位移最大值为 0.163m,相对挠度值为  $L/2650$ ,相对高程平均值最大误差为 0.074m,说明设计值与实测值较为接近;水准测量东西侧线型差值最大值为 0.091m,相对挠度值为  $L/4747$ ,说明桥梁左右幅相对位移较小。



a) 桥梁西侧设计与实测线型对比



b) 桥梁东侧设计与实测线型对比

图 5.7 桥梁设计与实测线型对比

桥梁竣工线型与设计线型之间会存在差异（由于竣工线型资料缺失，只能和设计线型进行比较。），桥梁在使用阶段线型也会逐渐偏离设计线型，因此实测线型与设计线型之间会存在差异；考虑到实测线型与设计线型非常接近，因此后续将无人机测量线型与人工实测线型进行对比，研究无人机线型测量算法的准确性。

### 5.3.3.2 无人机测量桥梁线型结果

#### 1. 基于整体最小二乘法提取桥梁线型

使用无人机倾斜摄影技术建立桥梁点云模型，在 CloudCompare 软件中对待测目标区域使用整体最小二乘法拟合目标区域，提取中心点坐标作为桥梁线型坐

标，计算结果如表 5.5-表 5.7 所示，其中表 5.5 为主桥桥面线型测量结果，表 5.6 和表 5.7 分别为北引桥和南引桥的线型测量结果，表中数据的单位均为 m。

表 5.5 主桥线型测量结果（单位：m）

测点编号	W13	W17	W21	W25	W29	E13
分析计算值	-1.828	-0.067	0.609	0.067	-1.836	-1.899
测点编号	E17	E21	E25	E29		
分析计算值	-0.081	0.821	0.080	-1.775		

表 5.6 北引桥线型测量结果（单位：m）

测点编号	W1	W5	W9	E1	E5	E9
分析计算值	-3.998	-3.338	-2.577	-4.024	-3.321	-2.604

表 5.7 南引桥线型测量结果（单位：m）

测点编号	W33	W37	W41	E33	E37	E41
分析计算值	-2.565	-3.367	-3.998	-2.508	-3.226	-4.024

## 2.基于 Alpha Shapes 边缘检测算法提取桥梁线型

在 C++软件中使用 Alpha Shapes 边缘检测算法提取桥梁投影于桥梁纵向（Y 轴）的边界点，设置体素栅格边长为 0.05m，滚动圆半径为 0.15m，C++计算结果如图 5.8 所示，可视化结果如图 5.9 所示，再在 MATLAB 中对提取的边界点进行拟合并计算与人工测点一致的桥梁相对高程坐标，如表 5.8-5.10 所示。

表 5.8 主桥线型测量结果（单位：m）

测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值
W13	-1.786	W22	0.698	E13	-1.743	E22	0.688
W14	-1.418	W23	0.561	E14	-1.371	E23	0.551
W15	-1.008	W24	0.337	E15	-0.962	E24	0.264
W16	-0.573	W25	0.000	E16	-0.501	E25	0.024
W17	-0.063	W26	-0.444	E17	-0.024	E26	-0.457
W18	0.252	W27	-0.913	E18	0.331	E27	-0.898
W19	0.512	W28	-1.360	E19	0.557	E28	-1.320
W20	0.679	W29	-1.789	E20	0.618	E29	-1.730
W21	0.736			E21	0.720		

表 5.9 北引桥线型测量结果 (单位: m)

测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值
W1	-3.975	W7	-2.973	E1	-3.923	E7	-2.879
W2	-3.862	W8	-2.773	E2	-3.794	E8	-2.718
W3	-3.660	W9	-2.628	E3	-3.644	E9	-2.503
W4	-3.503	W10	-2.465	E4	-3.486	E10	-2.313
W5	-3.340	W11	-2.236	E5	-3.237	E11	-2.147
W6	-3.186	W12	-2.036	E6	-3.083	E12	-1.980

表 5.10 南引桥线型测量结果 (单位: m)

测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值
W30	-1.970	W36	-3.083	E30	-1.957	E36	-3.067
W31	-2.169	W37	-3.330	E31	-2.115	E37	-3.226
W32	-2.353	W38	-3.515	E32	-2.308	E38	-3.412
W33	-2.516	W39	-3.653	E33	-2.464	E39	-3.594
W34	-2.702	W40	-3.817	E34	-2.684	E40	-3.767
W35	-2.938	W41	-3.946	E35	-2.837	E41	-3.931

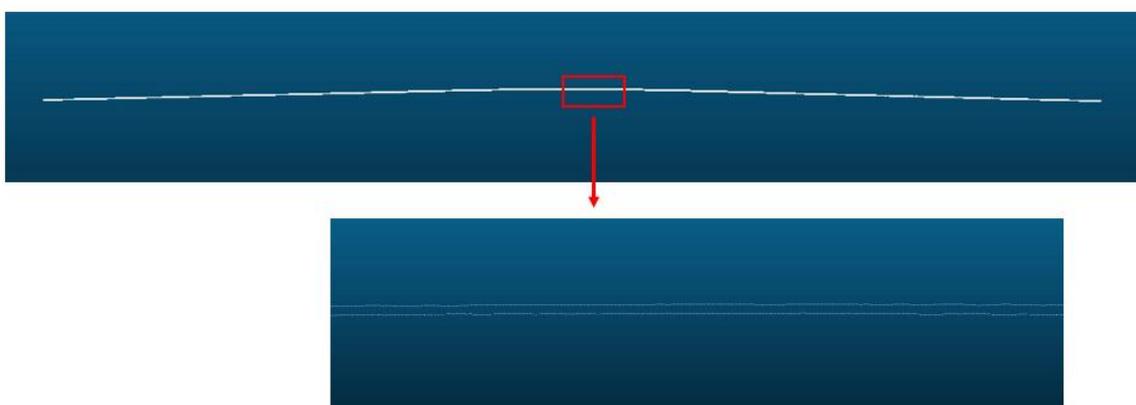


图 5.8 Alpha Shapes 边缘检测算法可视化结果

### 3. 基于改进的滑动窗口算法提取桥梁线型

使用 4.3.4 节所述改进的滑动窗口算法提取桥梁线型, 运算过程中将提取值由点云位移计算值更改为点云  $z$  坐标, 并计算与人工测点一致的桥梁相对高程坐标, 如表 5.11-5.13 所示。

表 5.11 主桥线型测量结果 (单位: m)

测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值
W13	-1.835	W22	0.660	E13	-1.875	E22	0.612
W14	-1.407	W23	0.545	E14	-1.434	E23	0.501
W15	-1.004	W24	0.305	E15	-1.022	E24	0.256
W16	-0.545	W25	0.000	E16	-0.548	E25	0.000
W17	-0.075	W26	-0.437	E17	-0.065	E26	-0.469
W18	0.246	W27	-0.923	E18	0.223	E27	-0.956
W19	0.507	W28	-1.361	E19	0.469	E28	-1.389
W20	0.651	W29	-1.812	E20	0.581	E29	-1.815
W21	0.703			E21	0.652		0.612

表 5.12 北引桥线型测量结果 (单位: m)

测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值
W1	-3.999	W7	-2.950	E1	-4.044	E7	-2.962
W2	-3.853	W8	-2.774	E2	-3.868	E8	-2.771
W3	-3.661	W9	-2.589	E3	-3.695	E9	-2.586
W4	-3.482	W10	-2.399	E4	-3.510	E10	-2.411
W5	-3.313	W11	-2.222	E5	-3.320	E11	-2.239
W6	-3.134	W12	-2.026	E6	-3.143	E12	-2.054

表 5.13 南引桥线型测量结果 (单位: m)

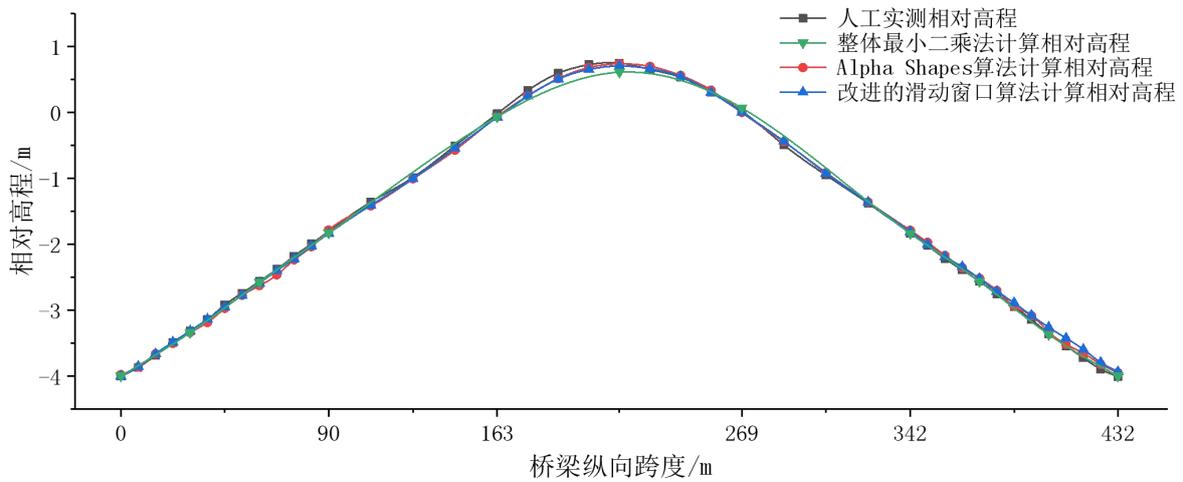
测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值	测点编号	分析计算值
W30	-2.001	W36	-3.079	E30	-1.999	E36	-3.100
W31	-2.190	W37	-3.259	E31	-2.183	E37	-3.289
W32	-2.341	W38	-3.423	E32	-2.374	E38	-3.472
W33	-2.521	W39	-3.593	E33	-2.546	E39	-3.655
W34	-2.713	W40	-3.790	E34	-2.719	E40	-3.838
W35	-2.888	W41	-3.932	E35	-2.917	E41	-3.982

#### 4.结果对比与分析

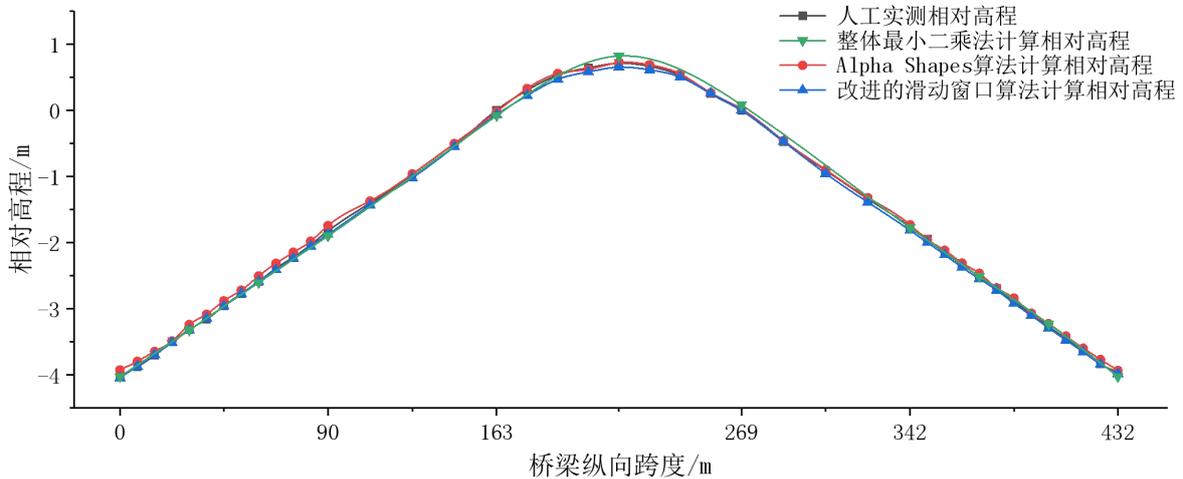
将以上分别使用整体最小二乘法、Alpha Shapes 边缘检测算法、改进的滑动窗口算法三种无人机方法提取的桥梁线型曲线与人工实测线型曲线进行对比,如图 5.10 所示,具体的数据对比如表 5.14 所示。

表 5.14 三种算法测量结果对比

算法名称	测量误差	测量误差	测量误差	平均误差相对 挠度值
	最大值/m	最小值/m	平均值/m	
整体最小二乘法	0.140	0.001	0.037	L/11676
Alpha Shapes 边缘检测算法	0.100	0.005	0.042	L/10285
改进的滑动窗口算法	0.129	0.002	0.035	L/12342



a) 西侧桥梁线型曲线结果对比



b) 东侧桥梁线型曲线结果对比

图 5.9 人工实测与无人机测量结果对比

由图 5.10 可知，利用 DJI Mavic2 无人机设备，基于无人机倾斜摄影技术和三种不同线型提取算法的计算结果与人工水准实测的测量结果拟合曲线比较接近，其中 Alpha Shapes 边缘检测算法和改进的滑动窗口算法的线型曲线与人工实测线型结果更为接近，这是因为整体最小二乘法测点数据相对较少导致的。若提高无人机设备的分辨率、降低影像采集高度，引入人工或网络 RTK 进行定位将能进一

步提高测量精度。由图 5.10 可知，基于无人机倾斜摄影技术的桥梁线型提取算法能有效提取桥梁线型，能在工程实践中推广应用。

从表 5.14 可知，三种算法的计算结果非常接近，说明三种算法的计算精度非常接近，但是在计算过程中，整体最小二乘法需要对全部人工测点分别进行平面拟合与坐标提取，其计算过程较为繁琐复杂，若需计算任意点的线型坐标时，还需单独对该点进行平面拟合与坐标提取，而 Alpha Shapes 边缘检测算法和改进的滑动窗口算法的计算过程更为简便，能一次性提取全桥所有点的线型坐标和全桥线型曲线，其中以改进的滑动窗口算法为更优，在实际工程中，优先推荐后两种算法进行桥梁线型提取。

将人工测量线型与无人机测量线型的工作量、人力需求、安全风险进行对比，如表 5.15 所示。从表中可知，无人机测量线型方法工作量明显降低，人力需求明显减少，基本没有安全风险问题。

表 5.15 人工测量与无人机测量工作过程对比

测量方法	工作量		人力需求	安全风险
	外业	内业		
人工测量	约 0.5 天	约 2h	2-3 人	存在交通安全问题
无人机测量	约 30min		1 人	无

## 5.4 本章小结

本章主要介绍了基于无人机倾斜摄影技术的桥梁线型提取方法，利用第二章所述方法和原理采集桥梁影像并建立桥梁三维实景模型和点云模型，对桥梁点云模型分别使用整体最小二乘法、Alpha Shapes 边缘检测算法和改进的滑动窗口算法提取桥梁线型，对梅溪湖大桥进行了人工线型实测验证了本研究所提出方法的有效性和鲁棒性。

(1) 本研究提出的三种无人机线型测量算法的平均误差在 0.035-0.042m 之间，平均误差相对挠度值在  $L/12342$ - $L/10285$ ，说明本研究所提出的三种方法均能对桥梁线型进行准确识别

(2) 整体最小二乘法相对 Alpha Shapes 边缘检测算法和改进的滑动窗口的计算精度相差不多，但是其计算过程相对繁琐，计算效率相对低下，在工程实践中，宜优先使用后两种算法进行线型提取。

(3) 人工测量梅溪湖大桥线型外业花费时间 0.5 天左右，需要人力 2-3 人，无人机测量梅溪湖大桥线型外业花费时间约 30min 左右，需要人力 1 人，在内业处理中，两者工作量相当，约 2h，说明无人机测量桥梁线型方法能极大提高测量效率，减少成本，降低安全风险。

## 结论与展望

桥梁是我国交通网络中的重要组成部分，我国桥梁数量庞大，分布广泛，桥梁的结构安全关乎着人民生命财产安全和国家社会稳定，然而由于桥梁在设计、施工等方面的缺陷，以及长期使用和外部环境的影响，桥梁的安全性能不断下降，而随着国家经济不断发展，人民对交通出行的需求不断提高，桥梁交通量日益增加，对桥梁的安全要求越来越高，因此，发展一种基于无人机技术的桥梁检测监测技术对桥梁进行快速可靠的安全评估具有重要意义。目前我国桥梁健康监测方法主要是通过人工巡检和定期检测等方式对桥梁进行维护和保养，这种方式效率较低，且需要投入大量人力物力，增加了维护成本，因此有待提出一种针对广大桥梁的快速检测监测方法。本文基于此背景提出了一种基于无人机倾斜摄影技术的桥梁逆向建模与变形测量方法，该方法能对桥梁进行快速可靠的检测监测，还可以降低成本，提高效率和可靠性，具有高效、精准、安全、便利等优点，该方法有望为桥梁检测监测领域的发展添砖加瓦。

本文将无人机倾斜摄影技术应用于桥梁检测监测领域，利用无人机建立桥梁实景模型和点云模型，在这些模型的基础上利用各种算法开展研究，在桥梁逆向建模、变形曲线提取、线型提取等方面进行了深入的研究，并通过实验室验证性试验和野外实桥试验证明了所提方法的有效性和鲁棒性。本文主要研究成果如下：

(1) 开展了基于无人机倾斜摄影技术的桥梁有限元逆向建模研究，提出了“阶梯式”摄影方法，解决了大水域面积下无人机建模产生大量空洞的问题，建立了桥梁精细实景模型，模型误差在 2% 以内；以长沙市巴溪洲大桥为对象开展了逆向建模研究，首先参数化有限元逆向建模过程为 49 个参数，将逆向建模过程转换为确定参数的过程，利用非均匀有理 B 样条曲线提取桥梁复杂尺寸数据，结合大数据信息和专家先验信息使用 Midas 实现了桥梁有限元模型逆向重建，对逆向模型进行精度验证与灵敏度分析，频率误差在 2% 以内，校验系数在 0.57-0.79 之间，进一步修正有限元模型，得到的逆向模型能准确反应桥梁真实响应。

(2) 开展了基于无人机倾斜摄影技术的桥梁挠度曲线提取研究，采集桥梁变形前后的影像建立两期桥梁点云模型，采用点云粗、精两阶段配准方法对桥梁点云模型进行配准，利用点云位移算法 (C2C、C2M、M3C2) 计算桥梁变形值，并通过试验研究了不同算法之间的精度差异，提出了一种基于抽样统计方法的改进的滑动窗口算法对桥梁进行挠度曲线提取，实现了对全桥挠度曲线的计算分析，开展了实验室试验，平均误差仅 0.379mm，证明了此方法有效性，同时还研究了测量精度与影像采集高度的关系，对长沙市巴溪洲大桥开展了实桥挠度测量试验，测量了温度引起的桥梁变形，测量误差不超过 2.8mm，证明了此方法的鲁棒性。

(3) 开展了基于无人机倾斜摄影技术的桥梁线型提取研究, 采集目标桥梁多视图影像建立桥梁实景模型和点云模型, 将整体最小二乘法、Alpha Shapes 边缘检测算法、改进的滑动窗口算法应用于桥梁线型提取中, 以长沙市梅溪湖大桥为例开展了桥梁线型测量试验, 将无人机测量结果与人工测量结果进行对比验证, 证明了无人机测量线型的有效性、实用性、高效性。

虽然本文从理论研究、试验验证等方面对桥梁倾斜摄影技术及在此基础上的各种方法、算法开展了深入的研究, 对利用无人机技术进行桥梁检测监测进行了深入的探讨, 但依然存在一些不足之处, 在以下问题中可以进行进一步的改进完善:

(1) 本研究开展的试验中, 除了第四章试验采用的是 DJI M300RTK 型无人机, 其他均采用的是 DJI Mavic2 型无人机, M300RTK 无人机具有 RTK 实时差分定位功能, 能准确获取自身定位, 而 Mavic2 无人机精度相对来说没那么高, 未来可以考虑对其他试验采用 M300RTK 型无人机进行数据采集或手动使用 RTK 进行打点, 可以进一步提高测量精度。

(2) 本研究开展的桥梁有限元逆向建模是以巴溪洲桥为研究对象, 对该桥的参数化结果仅适用于结构类型相似的桥梁, 未来可以考虑对多种结构类型桥梁开展逆向建模研究, 使本文所提逆向建模方法具有更强的通用性、鲁棒性。

(3) 本文在对巴溪洲大桥的挠度曲线进行提取研究时, 数据分析结果离散性较大, 未来若对该试验采用更优的数据分析方法和噪点剔除方法能进一步提高试验分析精度。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2021年交通运输行业发展统计公报. [http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/25/content\\_5692174.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/25/content_5692174.htm)
- [2] 孙加辉. 频率法测试既有混凝土桥板高强钢丝实际应力的试验研究.[郑州大学硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2010,5-6
- [3] 郑元勋, 郭慧吉, 谢宁. 基于统计分析的桥梁坍塌事故原因剖析及预防措施研究. 中外公路, 2017, 37(06): 125 - 133
- [4] 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
- [5] 侯秀丽. 桥梁工程重大坍塌事故调查与分析. [中南大学硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2006,10-11
- [6] 任昭昭. 基于车载效应数据的桥梁安全状态评估方法研究.[东南大学硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020,7-8
- [7] 茹继平, 李杰. 结构工程基础研究20年——来自国家自然科学基金委员会的报告. 建筑结构学报, 2017, 38(02): 1-9
- [8] Sarmadi H, Entezami A, Saeedi Razavi B, et al. Ensemble learning - based structural health monitoring by Mahalanobis distance metrics. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(2) : e2663
- [9] Erdenebat D, Waldmann D. Application of the DAD method for damage localisation on an existing bridge structure using close-range UAV photogrammetry. Engineering Structures, 2020, 218: 110727
- [10] Feroz S, Abu Dabous S. UAV-based remote sensing applications for bridge condition assessment. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1809
- [11] 李惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(I):系统设计. 土木工程学报, 2006(04): 39 - 44
- [12] Lei B, Wang N, Xu P, et al. New crack detection method for bridge inspection using UAV incorporating image processing. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31(5): 04018058
- [13] Metni N, Hamel T. A UAV for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits. Automation in Construction, 2007, 17(1): 3-10
- [14] 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

- 
- [15] Khaloo A, Lattanzi D, Cunningham K, et al. Unmanned aerial vehicle inspection of the Placer River Trail Bridge through image-based 3D modelling. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, 14(1): 124 – 136
- [16] Kim I-H, Jeon H, Baek S-C, et al. Application of crack identification techniques for an aging concrete bridge inspection using an unmanned aerial vehicle. *Sensors*, 2018, 18(6): 1881
- [17] Pan Y, Dong Y, Wang D, et al. Three-dimensional reconstruction of structural surface model of heritage bridges using UAV-based photogrammetric point clouds. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1204
- [18] Chen S, Laefer D F, Mangina E, et al. UAV bridge inspection through evaluated 3d reconstructions. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(4): 05019001
- [19] Ayele Y Z, Aliyari M, Griffiths D, et al. Automatic crack segmentation for UAV-assisted bridge inspection. *Energies*, 2020, 13(23): 6250
- [20] Mohammadi M, Rashidi M, Mousavi V, et al. Quality evaluation of digital twins generated based on UAV photogrammetry and TLS: Bridge case study. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3499
- [21] Bolourian N, Hammad A. LiDAR-equipped UAV path planning considering potential locations of defects for bridge inspection. *Automation in Construction*, 2020, 117: 103250
- [22] Duque L, Seo J, Wacker J. Bridge deterioration quantification protocol using UAV. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(10): 04018080
- [23] Whitley T, Tomiczek A, Tripp C, et al. Design of a small unmanned aircraft system for bridge inspections. *Sensors*, 2020, 20(18): 5358
- [24] Zollini S, Alicandro M, Dominici D, et al. UAV photogrammetry for concrete bridge inspection using Object-Based Image Analysis (OBIA). *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3180
- [25] Wang H-F, Zhai L, Huang H, et al. Measurement for cracks at the bottom of bridges based on tethered creeping unmanned aerial vehicle. *Automation in Construction*, 2020, 119: 103330
- [26] Yu Z, Shen Y, Shen C. A real-time detection approach for bridge cracks based on YOLOv4-FPM. *Automation in Construction*, 2021, 122: 103514
- [27] Kao S-P, Wang F-L, Lin J-S, et al. Bridge crack inspection efficiency of an unmanned aerial vehicle system with a laser ranging module. *Sensors*, 2022, 22(12): 4469

- [28] Yoon S, Spencer B F, Lee S, et al. A novel approach to assess the seismic performance of deteriorated bridge structures by employing UAV - based damage detection. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(7): e2964
- [29] Kao S-P, Chang Y-C, Wang F-L. Combining the YOLOv4 deep learning model with uav imagery processing technology in the extraction and quantization of cracks in bridges. *Sensors*, 2023, 23(5): 2572
- [30] Nasimi R, Moreu F. Development and implementation of a laser-camera-UAV system to measure total dynamic transverse displacement. *Journal of Engineering Mechanics*, 2021, 147(8): 04021045
- [31] Chen G, Liang Q, Zhong W, et al. Homography-based measurement of bridge vibration using UAV and DIC method. *Measurement*, 2021, 170: 108683
- [32] Wu Z, Chen G, Ding Q, et al. Three-dimensional reconstruction-based vibration measurement of bridge model using UAVs. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 5111
- [33] Zhuge S, Xu X, Zhong L, et al. Noncontact deflection measurement for bridge through a multi - UAVs system. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2022, 37(6): 746 - 761
- [34] Yan Z, Teng S, Luo W, et al. Bridge modal parameter identification from UAV measurement based on empirical mode decomposition and fourier transform. *Applied Sciences*, 2022, 12(17): 8689
- [35] Qin G, Zhou Y, Hu K, et al. Automated reconstruction of parametric BIM for bridge based on terrestrial laser scanning data. H. Liu. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1 - 17
- [36] Perry B J, Guo Y, Atadero R, et al. Streamlined bridge inspection system utilizing unmanned aerial vehicles (UAVs) and machine learning. *Measurement*, 2020, 164: 108048
- [37] 贺拴海, 王安华, 朱钊等. 公路桥梁智能检测技术研究进展. *中国公路学报*, 2021, 34(12): 12 - 24
- [38] Lubowiecka I, Armesto J, Arias P, et al. Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics. *Engineering Structures*, 2009, 31(11): 2667 - 2676
- [39] Conde-Carnero B, Riveiro B, Arias P, et al. Exploitation of geometric data provided by laser scanning to create FEM structural models of bridges. *Journal*

- of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(3): 04015053
- [40] Stavroulaki M E, Riveiro B, Drosopoulos G A, et al. Modelling and strength evaluation of masonry bridges using terrestrial photogrammetry and finite elements. *Advances in Engineering Software*, 2016, 101: 136 – 148
- [41] Conde B, Ramos L F, Oliveira D V, et al. Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge. *Engineering Structures*, 2017, 148: 621 – 638
- [42] Bautista-De Castro Á, Sánchez-Aparicio L J, Ramos L F, et al. Integrating geomatic approaches, operational modal analysis, advanced numerical and updating methods to evaluate the current safety conditions of the historical Bôco Bridge. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 961–984
- [43] Sánchez-Aparicio L J, Bautista-De Castro Á, Conde B, et al. Non-destructive means and methods for structural diagnosis of masonry arch bridges. *Automation in Construction*, 2019, 104: 360 – 382
- [44] Pepe M, Costantino D, Restuccia Garofalo A. An efficient pipeline to obtain 3d model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1235
- [45] Batar O S, Tercan E, Emsen E. Ayvalıkemer (Sillyon) historical masonry arch bridge: a multidisciplinary approach for structural assessment using point cloud data obtained by terrestrial laser scanning (TLS). *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, 11(5): 1239–1252
- [46] Yang H, Xu X, Neumann I. An automatic finite element modelling for deformation analysis of composite structures. *Composite Structures*, 2019, 212: 434–438
- [47] Castellazzi G, D’Altri A M, de Miranda S, et al. An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. *Engineering Structures*, 2017, 132: 229 – 248
- [48] Korumaz M, Betti M, Conti A, et al. An integrated terrestrial laser scanner (TLS), deviation analysis (DA) and finite element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Engineering Structures*, 2017, 153: 224 – 238
- [49] Moghaddame-Jafari B. Deflection measurement through 3D point cloud analysis. George Mason University, 2017

- [50] Acikgoz S, Soga K, Woodhams J. Evaluation of the response of a vaulted masonry structure to differential settlements using point cloud data and limit analyses. *Construction and Building Materials*, 2017, 150: 916–931
- [51] Kushwaha S K P, Pande H, Raghavendra S. Digital documentation, bridge deck linearity deformation and deck thickness measurement using terrestrial laser scanner (TLS) and close range photogrammetry (CRP). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, IV–5: 47–51
- [52] 石颖. 基于三维点云数据的桥梁空间形态及力学性能分析.[东南大学硕士学位论文].南京: 东南大学, 2019,30-32
- [53] Kwiatkowski J, Anigacz W, Beben D. A case study on the noncontact inventory of the oldest european cast-iron bridge using terrestrial laser scanning and photogrammetric techniques. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2745
- [54] 司梦元. 基于地面三维扫描的桥梁空间变形监测方法与应用研究.[重庆交通大学硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2021,50-51
- [55] 骆义. 基于三维激光扫描技术的结构检测监测应用研究.[东南大学硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021,20-23
- [56] 余加勇, 薛现凯, 陈昌富等. 基于无人机倾斜摄影的公路边坡三维重建与灾害识别方法. *中国公路学报*, 2022, 35(04): 77 - 86
- [57] Graves W, Aminfar K, Lattanzi D. Full-Scale Highway Bridge Deformation Tracking via Photogrammetry and Remote Sensing. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2767
- [58] 祝松男. 连续梁悬臂挂篮施工线型控制措施与应用研究.[华中科技大学硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2021,15-16
- [59] 何聪. 基于倾角传感器的桥梁线形实时监测系统设计与实现.[南京邮电大学硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2016, 21-22
- [60] Yang X L, Wei G X, Zhang W. Monitoring and evaluation on girder alignment of suspension bridge based on MATLAB. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 275–277: 1136–1140
- [61] Reagan D, Sabato A, Niezrecki C. Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges. *Structural Health Monitoring*, 2018, 17(5): 1056–1072
- [62] Barrile V, Candela G, Fotia A, et al. UAV survey of bridges and viaduct: workflow and application//*Computational Science and Its Applications–ICCSA*

- 2019: 19th International Conference, Saint Petersburg, Russia, July 1–4, 2019, Proceedings, Part IV 19. Springer International Publishing, 2019: 269-28
- [63] 何松霖. 基于序列图像特征匹配的桥梁轮廓线变形获取方法研究.[重庆交通大学硕士学位论文]. 重庆:重庆交通大学, 2019,17-18
- [64] 张晨畅. 基于三维扫描的悬索桥结构空间形位检测方法研究.[重庆交通大学硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2022,29-30
- [65] 石雪飞,许琪,马海英. 桥梁施工线形无人机测量方法与参数优化. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(01): 32 - 41
- [66] Xu Y, Zhang J. UAV-based bridge geometric shape measurement using automatic bridge component detection and distributed multi-view reconstruction. Automation in Construction, 2022, 140: 104376
- [67] 尚栋. 基于三维激光扫描的桥梁几何偏差检测方法研究.[重庆交通大学硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2021,55-56
- [68] 刘琼琼. 非量测相机近景摄影测量在桥梁线形监测上的研究与应用.[西南交通大学硕士学位论文]. 西南交通大学, 2015,8-9
- [69] 张绍成, 殷飞, 胡俊亮等. GPS/BDS-RTK与惯导组合实现大型桥梁垂向线形测量. 测绘科学, 2022, 47(06): 1 - 7
- [70] 真实地形建模网. 无人机倾斜摄影测量高级技术. <http://bestterrain.cn/>
- [71] 陈仁朋, 吴熠文, 余加勇等. 基于无人机影像序列的城市精细化三维模型精度评估. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 172 - 180
- [72] 刘洋. 无人机倾斜摄影测量影像处理与三维建模的研究.[东华理工大学硕士学位论文]. 南侧: 东华理工大学, 2016,17-18
- [73] 李红林. 无人机遥感影像空中三角测量应用研究.[电子科技大学硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2012,18-20
- [74] 周云, 刘鹏, 郝官旺等. 基于无人机倾斜摄影技术的桥梁有限元逆向建模方法研究. 湖南大学学报(自然科学版): 1 - 11 [2023-04-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1061.N.20230323.0924.002.html>
- [75] 吴熠文, 余加勇, 陈仁朋等. 无人机倾斜摄影测量技术及其工程应用研究进展. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(S1): 167 - 172
- [76] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Modeling the world from internet photo collections. International Journal of Computer Vision, 2008, 80(2): 189–210.
- [77] Rizo-Maestre C, González-Avilés Á, Galiano-Garrigós A, et al. UAV + BIM: Incorporation of photogrammetric techniques in architectural projects with

- building information modeling versus classical work processes. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): 2329
- [78] Wu C, Yuan Y, Tang Y, et al. Application of terrestrial laser scanning (TLS) in the architecture, engineering and construction (AEC) industry. *Sensors*, 2021, 22(1): 265
- [79] Rashidi M, Mohammadi M, Sadeghlou Kivi S, et al. A decade of modern bridge monitoring using terrestrial laser scanning: Review and future directions. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3796
- [80] Biliszczyk J, Hawryszków P, Teichgraber M. SHM system and a FEM model-based force analysis assessment in stay cables. *Sensors*, 2021, 21(6): 1927
- [81] He W, Jiang L, Wei B, et al. The influence of pier height on the seismic isolation effectiveness of friction pendulum bearing for Double-Track railway bridges. *Structures*, 2020, 28: 1870 - 1884
- [82] Sun J, Zhang J, Huang W, et al. Investigation and finite element simulation analysis on collapse accident of Heyuan Dongjiang Bridge. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 115: 104655
- [83] León-Robles C, Reinoso-Gordo J, González-Quiñones J. Heritage building information modeling (H-BIM) applied to a stone bridge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(3): 121
- [84] 陆新征. 城市抗震弹塑性分析. 北京: 清华大学出版社, 2021:15-16
- [85] 赵典刚. 基于三维激光扫描+实景建模的建筑逆向建模关键技术研究.[青岛理工大学硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2018,20-22
- [86] 赵典刚. 基于三维激光扫描+实景建模的建筑逆向建模关键技术研究.[青岛理工大学硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2018,20-22
- [87] 周云, 张军凯, 陈松柏等. 大跨度拱桥静动力试验与结构识别的实践. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(05): 10 - 19
- [88] 张雨薇. 基于密集点云数据的B样条拟合算法研究.[上海应用技术大学硕士学位论文]. 上海: 上海应用技术大学, 2021,40-42
- [89] 宋江珊. 露天矿排土场点云模型构建及其边缘警戒线提取研究.[西安建筑科技大学硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022,51-54
- [90] 张军凯. 大跨钢管混凝土拱桥的静动力试验及结构识别研究.[湖南大学硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2016,55-57
- [91] Saiti E, Danelakis A, Theoharis T. Cross-time registration of 3D point clouds.

- Computers & Graphics, 2021, 99: 139–152
- [92] Jiang J, Cheng J, Chen X. Registration for 3-D point cloud using angular-invariant feature. *Neurocomputing*, 2009, 72(16–18): 3839–3844
- [93] 朱琛琛. 基于ICP算法的点云配准研究.[郑州大学硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2019,43-46
- [94] Aiger D, Mitra N J, Cohen-Or D. 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration. *ACM SIGGRAPH 2008 papers*. Los Angeles California: ACM, 2008: 1–10
- [95] 张政. 点云数据配准算法研究.[山东大学硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2008,37-40
- [96] 张蒙. 基于改进的ICP算法的点云配准技术.[天津大学硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2013,20-22
- [97] Jia H, Zhu G, Guo L, et al. An improved point clouds model for displacement assessment of slope surface by combining TLS and UAV photogrammetry. *Applied Sciences*, 2022, 12(9): 4320
- [98] 刘平. 基于三维激光扫描技术的大坝变形监测方法研究.[南昌大学硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2021,34-35
- [99] 牛英杰. 三维激光扫描技术在高速公路沉降监测中的应用.[山东科技大学硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2019,47-48
- [100] CSDN. kd-tree 和 八 叉 树 的 概 念 及 相 关 算 法 .  
[https://blog.csdn.net/qq\\_33287871/article/details/107332728/](https://blog.csdn.net/qq_33287871/article/details/107332728/)
- [101] 刘平. 基于三维激光扫描技术的大坝变形监测方法研究[南昌大学硕士学位论文]. 南昌大学, 2021,34-35
- [102] 知乎. Delaunay三角网概述. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/568503946>
- [103] Seo H, Zhao Y, Chen C. Displacement mapping of point clouds for retaining structure considering shape of sheet pile and soil fall effects during excavation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, 148(5): 04022016
- [104] Lague D, Brodu N, Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 82: 10–26
- [105] 孟永东, 袁昌纬, 田斌等. 基于无人机航测点云比对的滑坡表面位移监测研究. *测绘通报*: 1 - 9 [2023-05-10].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2246.P.20220830.1723.003.html>

- [106] Xu Y, Zhang J. UAV-based bridge geometric shape measurement using automatic bridge component detection and distributed multi-view reconstruction. *Automation in Construction*, 2022, 140: 104376
- [107] 蒋小蕾, 刘义志, 赖华荣等. 三维激光扫描技术在工业测量中坐标提取方法研究. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(06): 215-216+218
- [108] Edelsbrunner H, Kirkpatrick D G, Seidel R. On the shape of a set of points in the plane. *IEEE*, 1993
- [109] CSDN. 隧道点云处理 (一): 投影边界提取 (Alpha Shapes) . [https://blog.csdn.net/weixin\\_46098577/article/details/119787523?spm=1001.2014.3001.5506](https://blog.csdn.net/weixin_46098577/article/details/119787523?spm=1001.2014.3001.5506)
- [110] 周云, 李剑, 刘鹏等. 融合无人机线型测量与振动测试的桥梁状态评估. *湖南大学学报 (自然科学版)*: 1 - 11 [2023-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1061.N.20230324.1634.003.html>

## 致 谢

时光荏苒，岁月如梭，转眼间就要结束在湖大的七年求学时光了。七年前第一次来到湖大，我踏上了牌楼路，也迈进了我的青春，我在这里度过了我精彩、丰富、充实的七年，我从一个稚嫩、内向的高中生成长为一个成熟、外向的研究生，在这里我学习了丰富的专业知识，结交了有趣的灵魂，收获了健康的身体，感谢湖大提供了这么大的平台，提供了这么多机会，让我能完成蜕变。

三年前，有幸考上研究生进入了周云老师课题组，由于周云老师的个人魅力，让我有了很多参与重大项目的机会，例如望城区 429 倒塌事故分析、国家自然科学基金项目、佛山南海之门项目等，从这些项目中我收获颇多，增加了许多见识，提升了不少能力。周云老师还注重对研究生综合素质、科研能力等多方面的培养，指导我们在人生之路、科研之路上的方向不断前行，从做 PPT、修改海报等一件件小事到指导课题、修改论文等重要之事，周老师对我们的指导全面且深刻，由衷的感谢周老师这三年来对我的孜孜教诲，祝福周老师身体健康，家庭和睦、幸福美满，科研和事业能更上一层楼。

三年来，感谢课题组同门师兄的陪伴，让我能更加坚定的前行，感谢师兄郝官旺、罗先明、胡健鑫、阳建波、李自强、张保证、周易、聂晶鑫对我的照顾，感谢同门危俊杰、郑佳缘、周晓枫、胡锦涛对我的陪伴和鼓励，感谢师弟师妹张文杰、叶鹏、张鑫、赵贺俊、陈嘉豪、张路遥对我的帮助。祝大家前程似锦，学业有成。

感谢好友吴玥、洪俊鹏、梁康殷、唐佼、温伟浩、周锐在研究生三年期间对我的陪伴和帮助，有幸与你们相识，你们让我的研究生生活更加丰富多彩，祝福大家幸福美满、前途光明。

感谢我的父母和家人对我的默默支持，让我能衣食无忧、全心全力的在这里完成学业，求学二十载，这一路的付出我都会铭记于心，愿我的父母身体健康，平安幸福。

最后，感谢各位评审专家、教授、老师能在百忙之中参与本论文的评审和答辩！

刘鹏

2023 年 4 月 2 日于湖南大学

## 附录A （攻读学位期间所发表的学术论文）

- [1] 周云, 刘鹏, 郝官旺等.基于无人机倾斜摄影技术的桥梁有限元逆向建模方法研究.湖南大学学报(自然科学版), 已录用
- [2] 周云, 李剑, 刘鹏等.融合无人机线型测量与振动测试的桥梁状态评估.湖南大学学报(自然科学版), 已录用

## 附录B （改进的滑动窗口算法代码）

```

%加载点云距离计算结果
X=sortrows(load('M3C2计算结果.txt'));
xxx=X(:,1);
yyy=X(:,2);
%旋转点云模型，使桥梁纵向与x轴平行
sita=82.8107;
x0=mean(xxx);y0=mean(yyy);
x=(xxx-x0)*cosd(sita)+(yyy-y0)*sind(sita)+x0;
y=-(xxx-x0)*sind(sita)+(yyy-y0)*cosd(sita)+y0;
hold on
scatter(x,y,'b');
Z=X(:,9);
%基于样本t分布寻找最优窗口值
z=Z*1000;
u=[x,z];
minx=min(x);
maxx=max(x);
p=[minx,maxx];
f=[minx,maxx];
k=[1,1];
h=[];
g=[];
meanq=[];
meang=[];
cordinatey=[];
for i=1:100
    k=[1,1];
    for w=1:i
        for r=1:length(k)-1
            t=(p(2)-p(1))/(w+1);
            v=f(r)+t;
            f=[f,v];

```

```

        f=sort(f);
        k=f;
    end
    f=[minx,maxx];
end
for j=1:length(k)-1
    index=find((u(:,1)>=k(j)&u(:,1)<=k(j+1))==1);
    data=u(index,2);
    meanz=mean(data);
    varz=var(data);
    varz2=var(data,1);
    CVz=varz2^0.5/meanz;
    e=tinv(0.975,length(data)-1)*varz/(length(data)^0.5);
    data3=[e];
    g=[g,data3'];
    data2=[meanz,varz2,CVz];
    h=[h,data2'];
    cordinatey=[cordinatey,meanz];
end
Q=h(3,:);
q=Q(~isnan(Q));
meanq=[meanq,mean(q)];
G=g(~isnan(g));
meang=[meang,mean(G)];
l=length(meang);
h=[];
q=[];
g=[];
end
%根据最优窗口提取变形曲线
index4=find(meang(1,:)==min(meang));
index5=[(2+(index4-1))*(index4-2)/2+1:(2+(index4))*(index4-1)/2];
targetz=cordinatey(1,index5);
s1=(maxx-minx)/index4;
t1=minx+s1/2;

```

```
k1=[t1];  
for i1=1:index4-1  
    t1=t1+s1;  
    k1=[k1,t1];  
end  
plot(k1,targetz);
```