

三维激光扫描技术在桥梁工程中的应用综述

鲁传安, 张春雷, 侯凤国

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 三维激光扫描技术(3D Laser Scanning Technology)是一种高精度、非接触式的空间数据获取技术,在桥梁工程中得到了广泛应用。该技术可用于桥梁施工质量检测、数字化模拟预拼装、施工过程监测以及桥梁运营监测等多个领域,为桥梁施工与管理提供了高效、精准的解决方案。在系统回顾三维激光扫描技术的基本原理和点云数据处理方法基础上,重点梳理了国内外学者在桥梁工程不同阶段的研究进展,总结当前技术的优势与不足,并展望未来发展趋势,以期为该技术在桥梁工程中的深入应用提供参考。

关键词: 桥梁工程; 三维激光扫描; 点云数据; 预拼装; 运维监测

中图分类号: U443.36; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0230-05

Review on Application of 3D Laser Scanning Technology in Bridge Engineering

LU Chuanan, ZHANG Chunlei, HOU Fengguo

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: 3D laser scanning technology is a high-precision, non-contact spatial data acquisition technique that has been widely adopted in bridge engineering. This technology can be used for the quality inspection of bridge construction, digital simulated pre-assembly, construction process monitoring, and bridge operation and maintenance, providing the efficient and precise solutions for bridge construction and management. Based on a systematic review of the fundamental principles of 3D laser scanning technology and point cloud data processing methods, the research progress of scholars at home and abroad in different stages of bridge engineering has been mainly sorted out, the current advantages and limitations of the technology are summarized, and the future development trend is prospected in order to provide the references for the further application of this technology in bridge engineering.

Keywords: bridge engineering; 3D laser scanning; point cloud data; pre-assembly; operation and maintenance monitoring

0 引言

桥梁作为重要的交通基础设施,其建设和维护直接关系到交通安全和经济发展。随着桥梁规模的不断扩大和施工工艺的进步,传统的测量与监测方法已难以满足现代桥梁工程的高精度、自动化需求。近年来,三维激光扫描技术因其高效、精准、无接触等特点,在桥梁工程中得到了广泛应用。三维激光扫描技术是一种通过激光测距、角度测量和数据处理等手段获取物体表面点云数据的技术。该技术能够在短时间内获取桥梁结构的高精度三维坐标信

息,结合BIM(建筑信息模型)和GIS(地理信息系统)等技术,可广泛应用于桥梁施工质量检测、模拟预拼装和运维监测等方面。

本文通过梳理三维激光扫描技术在桥梁工程中的应用现状,结合国内外学者的研究成果,系统分析该技术在桥梁施工质量检测、数字化模拟预拼装以及桥梁运维监测中的应用,并总结当前的技术挑战与未来发展趋势,以推动三维激光扫描技术在桥梁建设和维护中的深入应用。

1 三维激光扫描仪技术的基本原理

三维激光扫描技术基于激光测距与空间定位原理,通过发射激光脉冲或连续波束至目标表面,接收反射信号计算距离,结合内置精密角度传感器(水平/垂直旋转棱镜)及惯性导航系统(INS)记录方位

收稿日期: 2025-07-16

基金项目: 新疆维吾尔自治区“2+5”重点人才计划项目“新疆装配式桥梁设计与施工关键技术研究”()

作者简介: 鲁传安(1983—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计及工程管理工作。

角与姿态角,逐点获取目标表面三维坐标(X,Y,Z)及反射强度信息,形成高密度点云数据。扫描仪通过高速旋转或阵列扫描实现全向覆盖,点云经去噪、配准后重构为三维模型。其精度受激光波长、扫描速率、入射角度及环境干扰等因素影响,典型精度可达毫米级,适用于桥梁等复杂结构的非接触式高精度测量,见图1。



图1 三维激光扫描桥梁预制构件

三维激光扫描技术具备多种优势:首先,其测量精度可达毫米级甚至亚毫米级,满足桥梁构件几何测量及复杂形态监测需求;其次,快速采集能力显著提升了工作效率,可在短时间内完成大规模点云数据的获取。此外,该技术的非接触特性确保了测量过程的安全性和高效性,特别适用于难以接近或敏感的目标物体。生成的点云数据可用于三维建模、误差分析及虚拟仿真,直观展现结构特征。

2 点云数据处理

三维激光扫描技术能够快速获取物体表面的高精度三维点云数据,但这些原始数据通常包含噪声、冗余和不规则分布等问题,需要经过一系列处理才能应用于实际工程。点云数据处理步骤主要包括去噪、配准和三维建模等步骤。

2.1 点云去噪

点云去噪是三维激光扫描数据处理中的关键环节。张金花^[1]等针对地面三维激光扫描点云噪声问题,提出离群、平滑与统计三类去噪算法。离群去噪基于邻域距离阈值筛选孤立噪点,适用于室内密集场景,但对稀疏区域误判率高;平滑去噪通过邻域均值替换异常点,可消除面状区域凸起噪声,但易导致

2.3 点云分割

分割是将点云数据划分为具有相似特征的子集,以便于后续处理。方法包括基于区域生长、聚类分析和模型拟合等。杨必胜^[6]等系统梳理了基于区域生长、聚类分析和模型拟合等经典方法的进展,指

边缘模糊;统计去噪基于正态分布剔除密度异常点,适合小场景散点清理,但计算耗时。实验表明:离群去噪适配相位式扫描仪(如Faro Focus3D)的密集数据,统计去噪有效处理室外孤点,平滑去噪需权衡精度与失真风险。研究为不同场景提供针对性方案,但需结合需求平衡效率与精度。

吴一全^[2]等综述了近6年来基于深度学习的三维点云去噪处理方法的研究进展,涵盖五大类:基于卷积网络的去噪方法,利用卷积网络学习特征差异去噪,但对大孔洞效果有限;上采样方法,通过生成密集点云去噪,依赖稀疏-密集点云对训练,真实场景泛化性待提升;滤波方法,结合传统滤波与深度学习,保留几何特征但依赖法线估计;梯度方法,通过梯度场迭代去噪,鲁棒性强但分布均匀性不足;其他方法,引入Transformer提取多尺度特征,显著提升精度但计算复杂。研究指出当前难点包括动态噪声抑制(如车辆振动)、亚毫米级裂缝识别及实时性不足,未来可融合多光谱扫描与自适应滤波优化鲁棒性,并推动轻量化网络与真实场景适配。DnPCD-Net通过深层非局部网络捕捉点之间的长程依赖关系,显著提高了去噪效果^[3]。

2.2 点云配准

点云配准是将不同视角获取的点云数据对齐,形成完整的三维模型。点云配准作为关键步骤,受到了国内外学者的广泛关注。传统的配准方法主要包括迭代最近点(ICP)算法及其改进版本,广泛应用于刚性点云配准任务。然而,ICP算法对初始位姿敏感,且易陷入局部最优解。为此,研究者引入了特征匹配方法,如基于三维形状的配准技术,通过提取点云特征实现初始对齐。

随着深度学习的兴起,基于学习的方法在点云配准领域取得了显著进展。胡翔云团队^[4]提出了SCREAM模型,针对低重叠和无重叠点云配准问题,利用场景渲染对抗策略,实现了高精度的自动配准。此外,武越等人^[5]综述了计算智能方法在三维点云配准中的应用,指出这些方法在处理点云配准问题时表现出较强的鲁棒性和泛化性,适用于点云重叠程度低的情况。点云配准主要方法及对比见表1。出融合法向量和曲率的区域生长策略在规则结构中具有较好表现。王金^[7]等针对中小型RC桥梁点云分割精度不足的问题,提出一种密度自适应区域生长算法。通过引入密度因子(DF)动态调整搜索半径和分割阈值,解决传统方法对密度不均的敏感性

表 1 点云配准方法对比表

方法名称	优点	缺点	适用场景
ICP(迭代最近点)	简单高效,适合小范围精配准	对初始位置敏感,易陷入局部最优	姿态初始差小的构件
SAC-IA(特征匹配法)	初始位姿鲁棒性强,适合粗配准	计算复杂,依赖特征质量	大形变构件初始对齐
NDT(正态分布变换)	快速,适合大场景、低分辨率数据	精度略低于 ICP,参数敏感	大范围场景初步配准
深度学习方法(如 PRNet)	自动化高,适应性强	需大量训练数据,泛化能力待提升	智能化监测系统

问题:在高密度区域缩小搜索范围,低密度区域扩大搜索范围,并结合 RANSAC 优化小聚类。实验基于 4 座公共数据集和 3 座实地桥梁点云,对比 RANSAC、DBSCAN 和传统区域生长算法,其准确率、召回率和平均交并比(IoU)分别达 90.85%、90.82% 和 84.31%,分割效率提升显著。

2.4 三维建模

三维建模是点云数据处理的核心环节,从点云数据生成连续的三维表面模型,常用方法有 Delaunay 三角化、Poisson 重建和基于隐式函数的重建等。传统的建模方法主要依赖于手动处理,效率较低,且难以应对复杂结构。随着算法和计算能力的提升,自动化和半自动化的建模方法逐渐兴起。

3 施工质量检测

三维激光扫描技术以其高精度、非接触式和高效的数据采集能力,已在桥梁构件质量检测领域得到广泛应用,特别是在复杂钢结构构件的质量检查方面。杜仲云和胡伟^[8]提出了一种基于三维激光扫描技术的桥梁钢结构构件质量检测方法,旨在解决传统钢卷尺测量效率低、精度不足的问题。通过移动式 C-Track 高清双 CCD 设备与便携式三维激光采集器,快速获取高精度点云数据,结合 BIM 模型实现构件全尺寸数字化检测。该技术尤其适用于复杂钢构件的几何参数检测与质量管控,有效保障了桥梁施工的安全性与经济性,为钢结构数字化质检提供了系统化解决方案。暴环宇与齐成龙^[9]研究了适用于钢梁的高效点云检测流程,提出基于区域约束的配准与断面误差提取技术,实现了构件错台、宽厚偏差等关键指标的快速识别与量化分析,提升了构件质量验收的数字化水平。

刘亚超^[10]提出了一种基于 BIM 与三维扫描融合的偏差检测方法,通过将 BIM 模型转换为理论点云,并与实际扫描点云进行配准,显著提高了检测效率。其改进的凸包算法实现了轮廓线的快速提取,而基于 Delaunay 三角剖分的轴线拟合方法则解决了不规则截面形心计算的难题。实验表明,该方法可将桥

墩截面尺寸偏差控制在 4 mm 以内,轴线偏差控制在 6 mm 以内,较传统方法精度提升 30% 以上。

4 数字化模拟预拼装

数字化模拟预拼装是通过三维激光扫描技术对桥梁构件进行扫描,结合 BIM(建筑信息模型)和点云数据,提前进行虚拟拼装,以减少现场拼装的误差,提高施工精度。近年来,三维激光扫描技术在桥梁工程中的模拟预拼装领域取得了显著进展,为工业化建造的预制拼装桥梁发展提供了有力支持。

罗永权和张鸿飞^[11]提出了一种以三维激光扫描仪为主要数据获取手段的模拟预拼装方法,旨在替代传统的现场立体拼接检验方式。该方法通过对大型桥梁构件进行三维扫描建模,在计算机中进行数字化模拟预拼装,验证构件加工质量并指导现场修正。项目实践结果表明,该方法建模快捷、有效,模型配准精度较高,能真实反映构件质量,为装配化施工提供了技术支撑。

石立鹏等^[12]针对钢桁架桥梁传统实体预拼装成本高、效率低的问题,提出了一种基于三维激光扫描的虚拟预拼装技术。通过高精度点云数据获取构件几何信息,结合 BIM 模型与算法优化,开发了智能预拼装系统。该系统主要特点包括:采用 ICP 算法实现点云与理论模型的精准配准,利用 RANSAC 算法提取杆件螺栓孔心及边角特征点,并通过区域生长法分割复杂点云数据,降低运算量。系统支持孔位偏差检测、几何尺寸比对及拼装误差可视化分析,生成定制化质检报告。实验表明,该方法可量化累积误差至毫米级,螺栓孔通孔率满足规范要求,减少返工成本 50% 以上。实际工程应用中,系统成功替代实体预拼装,缩短工期 30%,精度较人工测量提升显著。研究构建了“数据采集-特征提取-虚拟拼装-动态调整”的技术闭环,为钢桁架桥梁数字化施工提供了高效、低成本的解决方案,推动了桥梁制造智能化发展。

周绪红等^[13]针对大型复杂钢结构桥梁,提出了基于点云数据的数字化预拼装方法。该方法主要步骤如下:点云数据采集:采集桥梁构件的局部点云数

据,降低采集难度和数据处理成本;拼接控制点智能提取:采用随机采样一致性(RANSAC)算法和霍夫变换,从局部点云中自动提取控制点;拼接控制点智能匹配:利用超四点快速鲁棒匹配算法(Super-4PCS)、迭代最近邻算法(ICP)和广义普氏分析算法(GPA),实现控制点的高效自动匹配;虚拟预拼装:将提取的点云数据与设计BIM模型进行比对,分析拼接误差并生成修正建议。研究团队采用多尺度点云数据采集方案,结合智能算法,实现了构件的虚拟拼装和精度分析。该方法在重庆两江新区寨子路钢拱桥和重庆郭家沱长江大桥的工程实践中得到了验证,通过三维激光扫描技术,研究团队实现了构件的虚拟拼装和精度分析,确保了拱肋的精准安装,减少了现场调整时间,显著提高了施工效率和质量,见图2。

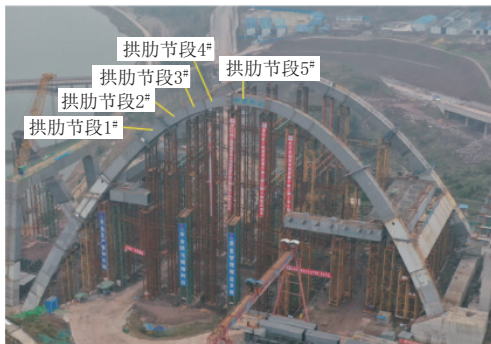


图2 重庆郭家沱长江大桥拱肋合龙

此外,罗博仁等^[14]依托某钢桥项目,对基于三维激光扫描的模拟预拼装技术进行了优化改进和试验验证。通过多测站扫描结合球形靶标融合点云数据,采用曲率降采样降低冗余,构建轻量化曲面模型,实现钢桥单节段细节(误差不大于2 mm)与多节段形态的高精度表达。试验结果表明,采用该技术可实现对钢桥单节段局部细节和整体形态的精准表达,模拟预拼装精度满足相关规范要求,为钢桥数字化施工提供高效解决方案,推动了预拼装技术的智能化发展。

三维激光扫描技术在桥梁模拟预拼装领域的应用研究不断深入,相关学者的研究成果为装配化施工和质量控制提供了新的思路和方法。未来,随着技术的进一步发展和完善,该技术有望在桥梁工程中发挥更大的作用。

5 桥梁运维监测

桥梁运维阶段的健康监测是保障桥梁长期安全运营的重要措施。三维激光扫描技术能够提供高精度的桥梁几何形状、变形以及裂缝尺寸等数据,为桥

梁的预防性维护和维修决策提供科学依据。主要应用包括:

5.1 桥梁形变监测

采用定期扫描方式,获取桥梁在不同时间段的形态变化数据,分析桥梁的沉降、挠度变化、支座位移等情况。结合历史数据建立桥梁变形趋势预测模型,为桥梁结构健康管理提供数据支持。熊文等^[15]研究了三维激光扫描在桥梁形态变化监测中的应用,提出了一种基于点云数据的桥梁变形趋势分析方法,提高了桥梁健康监测的智能化水平。章涛等^[16]利用三维激光扫描技术监测桥梁振幅,针对监测区域,通过对比分析不同时段的点云数据,确定桥梁的振动特性和变形量。研究引入误差熵来消除相邻点之间的误差影响,控制误差空间不确定性的影响,最终确定点云变形可监测指标。该方法在平板模拟实验和实际桥梁变形监测中得到了验证。胡洋等^[17]以江苏润扬大桥为例,探讨了三维激光扫描技术在桥梁变形监测中的应用。研究详细介绍了外业扫描、点云拼接去噪、成果图绘制及变形分析等步骤,为桥梁监测提供了新的方法和经验。

5.2 裂缝检测

采用高分辨率激光扫描技术检测桥梁结构表面的微小裂缝,并通过AI算法自动识别裂缝类型和扩展趋势。结合光学传感技术,实时监测裂缝发展情况,确保及时采取加固措施。

韩国首尔大学 Soojin Cho 等^[18]提出了一种基于地面激光扫描(TLS)与八叉树结构的混凝土裂缝检测方法,旨在解决传统检测技术数据量大、分辨率低的问题。通过将点云数据转换为八叉树结构,压缩数据量至原数据的50%以上,同时保持裂缝检测精度。该方法结合K-means聚类分割图像背景、结构缝与表面;改进中值滤波与差分算法增强裂缝特征;利用Otsu二值化及形态学操作精准提取裂缝轮廓。实验以韩国某混凝土坝溢流墙为对象,使用Leica ScanStation C5扫描仪获取数据,验证表明,在压缩50%的数据下,主要裂缝识别准确率达84%,最小裂缝宽度检测至0.1mm,误检率显著低于传统摄影方法。该方法支持远距离(约30m)非接触式检测,可高效处理大面积复杂表面,减少人工干预,为基础设施健康监测提供了自动化、高精度的解决方案。近年来,基于深度学习的裂缝检测方法如1D-CNN-LSTM,测试准确率达99.25%,显著提升了检测效率^[19]。

葛云峰等^[20]研究利用相移式地面激光扫描仪获

取三维点云数据,实现裂缝的自动测量。该方法结合k-近邻和主成分分析算法,通过点法线偏差识别裂缝,并利用主轴和曲线骨架分别确定裂缝的投影和真实尺寸。通过坐标变换估计裂缝的投影尺寸,提取曲线骨架和横截面以表示真实尺寸。两例表面裂缝的验证结果显示,横截面法和手动测量得到的裂缝宽度和深度相近,但略小于投影算法的结果;曲线骨架法测得的裂缝长度略大于手动测量和投影法的结果。总体而言,该方法测得的裂缝真实尺寸与实际情况高度一致。

5.3 数字化档案管理

通过三维扫描数据建立桥梁的数字孪生模型,集成桥梁的结构信息、施工记录、运营数据等,实现桥梁的智能化管理。结合GIS系统,实现桥梁运维数据的可视化展示,提高养护管理的科学性和决策效率。骆义等^[21]研究了基于三维激光扫描技术的桥梁检测应用。针对缺少设计资料的老旧桥梁,研究团队通过建立三维模型,提取了桥梁结构精确的几何尺寸信息,并给出了其几何轮廓线和几何变形,为桥梁结构状态评估提供了有效手段。尹恒等^[22]针对现有桥梁健康监测手段的局限性,以大邑县虎跳河大桥为试验对象,采用三维激光扫描技术进行危旧桥梁健康监测研究。通过控制测量、靶标布设、数据预处理、拼接优化等过程,研究团队获取了高精度的点云数据。利用点云数据制作的桥面模型进行垂向变化对比,分析桥墩和桥台的沉降情况,并通过拱腹线和桥墩轮廓线的位移分析,评估桥梁的变形状态。

6 发展趋势

6.1 结合人工智能(AI)提升自动化处理能力

未来,三维激光扫描技术将与AI深度融合,利用深度学习算法实现点云数据自动分类、异常检测和状态识别。AI驱动的自动化数据分析将提高施工监测和运维管理的智能化水平,减少人工干预,提高检测精度和效率。例如当前基于深度学习的裂缝检测方法能够自动识别和分类桥梁裂缝,提高检测效率和准确性。

6.2 发展实时监测与云计算处理

未来的桥梁监测系统将结合云计算和边缘计算,实现实时数据采集、分析和存储。例如,利用无人机搭载轻量化激光扫描设备,结合5G网络传输,实时上传桥梁检测数据至云端,进行自动化分析,提高监测的及时性和决策效率。

6.3 多源数据融合与智能建造

未来三维激光扫描技术将与其他智能建造技术融合,如BIM、GIS、卫星遥感等,形成多源数据融合的桥梁数字孪生系统。通过多源数据融合,可以进一步提升桥梁施工和运维阶段的智能化管理水平。

7 结 语

三维激光扫描技术在桥梁工程中展现出广泛的应用价值,涵盖施工质量检测、数字化模拟预拼装及桥梁运维监测等环节,极大提升了桥梁施工的精度和效率,保障了在役桥梁运行安全可靠。然而,该技术仍然面临数据处理复杂、设备成本较高、实时监测难度大等挑战。未来,随着人工智能、云计算、5G网络和多源数据融合技术的进一步发展,三维激光扫描技术将在桥梁工程中发挥更重要的作用,实现更高效、更智能的桥梁建造与管养。

参考文献:

- [1] 张金花,吴思,胡本刚,等.基于地面三维激光扫描仪点云数据的去噪算法研究[J].测绘与空间地理信息,2016,39(3):76-78.
- [2] 吴一全,陈慧娴,张耀.基于深度学习的三维点云处理方法研究进展[J].中国激光,2024,51(5):1-23.
- [3] Sheng Huankun, Li Ying. Deep non-local point cloud denoising network [J]. Applied Soft Computing, 2025, 171: 112835.
- [4] Hu Xiangyun. Scene Rendering Adversarial Model for Low-and-Non Overlap Point Cloud Registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 51(5): 1-223.
- [5] 武越,苑咏哲,向本华,等.三维点云配准中的计算智能方法综述[J].中国图像图形学报,2023,28(9):2763-2787.
- [6] 杨必胜,梁福逊,黄荣刚.三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J].交通科技与管理,2017,46(10):1509-1516.
- [7] 王金,刘斌,王国强,等.中小型RC桥梁点云自适应分割及BIM建模[J].交通科技与管理,2024,5(13):1-3.
- [8] 杜仲云,胡伟.基于三维激光扫描的桥梁钢结构构件质量检查方法研究[J].土木建筑工程信息技术,2017,9(5):113-117.
- [9] 暴环宇,齐成龙.大型预制钢梁三维激光扫描检测技术研究[J].铁道建筑技术,2024(6):111-113.
- [10] 刘亚超.三维扫描在桥梁施工几何偏差检测中的应用研究[J].中国科技信息,2022(24):68-70.
- [11] 罗永权,张鸿飞,等.三维激光扫描技术在桥梁构件模拟预拼装中的应用[J].测绘与空间地理信息,2017,40(11):167-170.
- [12] 石立鹏,宋红飞.基于三维扫描的钢桁架桥梁虚拟预拼装技术研究[J].交通科技与管理,2024,5(1):11-13.
- [13] 周绪红,刘介鹏,程国忠,等.基于点云数据的大型复杂钢拱桥智能虚拟预拼装方法[J].中国公路学报,2021,34(11):1-9.
- [14] 罗博仁,吴游宇,余绍淮.钢桥数字化模拟预拼装技术研究[J].建筑技术,2023,54(9):1067-1070.
- [15] 熊文,石颖,丁旭东,等.基于点云模型的桥梁构件形态变化趋势识别与分析[J].桥梁建设,2018,48(6):35-40.

(下转第240页)