

文章编号 1004-924X(2026)15-2317-14

户外适应的主缆空隙率结构光测量系统

罗 利¹, 马 瑞¹, 邹易清², 张 皓², 王跃学², 王晓浩¹, 李星辉^{1*}

(1. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;

2. 柳州欧维姆机械股份有限公司, 广西 柳州 545005)

摘要:针对强光照、高温与高湿等户外紧缆施工环境下主缆空隙率难以实现非接触式精密测量的问题,提出一种基于多面结构光相机协同采集的主缆空隙率测量系统。该系统采用四台面结构光相机环绕主缆按 90°等间隔布置,实现主缆表面 360°全周向点云采集;同时集成机械遮光、TEC 制冷单元与视窗加热薄膜,以提高系统在户外复杂环境下的光学成像稳定性与环境适应能力。在多相机标定方面,采用基于视场重叠约束的张正友标定方法完成四路相机的全局外参标定,统一多相机坐标系,并实现主缆点云的高精度拼接。实验结果表明,所构建系统在 50℃、高湿及 10⁵ lux 强光照条件下仍能够稳定获取高质量主缆点云,多相机联合标定的平均重投影误差低于 0.7 pixel,主缆点云实现毫米级空间拼接,主缆截面积测量相对误差低于 0.3%。结果验证了该系统在户外紧缆施工场景下开展主缆空隙率非接触式精密测量的可行性与工程应用价值。

关 键 词:主缆空隙率;户外紧缆施工;环境适应;面结构光相机;多相机标定

中图分类号:TH741;U446.2 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263415.2317

CSTR:32169.14.OPE.20263415.2317

Outdoor-adapted structured light measurement system for main cable void ratio

LUO Li¹, MA Rui¹, ZOU Yiqing², ZHANG Hao², WANG Yuexue², WANG Xiaohao¹, LI Xinghui^{1*}

(1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. Liuzhou OVM Machinery Co., Ltd., Liuzhou 545005, China)

* Corresponding author, E-mail: li.xinghui@sz.tsinghua.edu.cn

Abstract: Accurate non-contact measurement of the main cable void ratio remains challenging under strong sunlight, high temperature, and high humidity during outdoor cable-compaction construction. To address this issue, a main-cable void-ratio measurement system based on cooperative acquisition by multiple area structured-light cameras was developed. Four area structured-light cameras were arranged at 90° intervals around the main cable to acquire full-circumference point clouds of the cable surface. To improve imaging stability and environmental adaptability under complex outdoor conditions, mechanical shading, a thermoelectric cooling unit, and a window heating film were integrated into the system. For multi-camera calibration, Zhang's calibration method constrained by field-of-view overlap was employed to obtain the global extrinsic parameters of the four cameras, unify the multi-camera coordinate system, and achieve

收稿日期:2026-05-07;修订日期:2026-06-02.

基金项目:深圳市科技计划资助项目(No. JCYJ20240813112003005)

high-precision point-cloud registration. Experiments demonstrated that the system could stably acquire high-quality main-cable point clouds at 50 °C, high humidity, and an illumination intensity of 10^5 lx. The average reprojection error of the multi-camera joint calibration was less than 0.7 pixels, millimeter-level spatial registration of the main-cable point cloud was achieved, and the relative error in main-cable cross-sectional area measurement was below 0.3%. These results demonstrate the feasibility and engineering applicability of the proposed system for non-contact precision measurement of main-cable void ratio in outdoor cable-compaction construction.

Key words: main cable void ratio; outdoor cable-compaction construction; environmental adaptation; area structured-light camera; multi-camera calibration

1 引 言

跨江跨海悬索桥是现代交通网络中的关键基础设施,主缆空隙率是评价成缆与紧缆施工质量的核心指标^[1-2]。空隙率定义为主缆横截面内未被钢丝实体占据的空隙面积与主缆总截面积之比,即截面内空气间隙面积所占比例。空隙率过高会导致水分与腐蚀性介质更易侵入钢丝束内部,严重威胁桥梁结构的长期服役安全。然而,在紧缆受力状态下,主缆截面因钢丝束挤压常呈不规则椭圆形,传统接触式测量方法通常以理想圆截面为前提,其测量结果存在显著的原理性误差。此外,跨河海施工现场的高空受限环境及复杂气象条件限制了传统大型检测装备的现场部署与应用。因此,亟需一种非接触式、全截面覆盖且具备高环境适应性的高精度三维测量技术,以突破主缆空隙率精密检测的工程瓶颈。

在大尺寸目标三维形貌获取方面,土木工程领域的非接触测量方法主要可归纳为三类^[3-6]:其一为基于地面激光扫描、UAV-LiDAR及多源点云融合的方法,能够实现桥梁主梁、桥塔及缆索等关键构件的三维几何重建、线形识别与变形测量。相关技术路径主要包括多站点点云获取、点云配准与去噪、基于切片或拟合的特征提取,以及面向桥梁形态参数的自动识别与可视化分析,已在桥梁线形与变形监测中实现厘米级几何感知,适于大尺度巡检^[7-9];其二为线结构光技术,其通过激光条纹投射、光条中心提取、截面轮廓重建以及多截面配准与优化,实现目标局部几何形态的高精度非接触测量^[10-15]。该方法已应用于钢轨断面测量、磨耗识别以及隧道喷射混凝土高度监测、隧道轮廓三维重建等场景,表现出较好的

实时性、局部精度和工程适应性,但仍依赖扫描机构与路径控制,现场部署复杂;其三为面结构光相机^[16-20]利用光机投影仪向目标表面投射 Gray-code、相移条纹或干涉条纹,经相机采集后进行相位/编码解算、点云重建,从而实现全场三维形貌恢复与几何偏差分析。该方法已应用于预制混凝土构件尺寸与预埋件检测、建筑构件变形跟踪、混凝土断裂面粗糙度表征以及路面纹理与病害重建等场景,体现出非接触、高密度和可视化测量的优势,但其工程应用仍受视场遮挡与复杂环境稳定性约束。

紧缆机常在跨河海大桥的主缆上进行紧缆作业,作业环境存在户外强光照、高温及高湿盐雾等恶劣条件。当上述三类三维测量方法直接应用于紧缆施工现场时,仍面临以下挑战:一是测量精度与尺度不匹配,如 LiDAR 获取的点云多为厘米级精度,难以满足空隙率计算所需的毫米级精度要求;二是极端环境适应性不足,跨河海工况常伴随强太阳辐射、高温及高湿盐雾,极易导致结构光散射及光学传感器过曝,影响点云重建质量^[21-24];三是全景覆盖能力受限,单一视角设备无法实现主缆 360°全截面同步测量;四是系统部署灵活性差且成本高昂,难以与紧缆机实现空间上的紧凑集成与实时协同作业。

针对上述问题与挑战,本文提出并研制了一种专为跨河海悬索桥主缆紧缆检测设计的户外自适应环绕式条纹投影结构光测量系统。该系统以 90°等间隔布置四台高精度面结构光相机以消除环向视野盲区,采用基于视场重叠约束的张正友多相机标定算法^[25-28]统一全局坐标系实现主缆点云毫米级空间配准;测量系统配置集成了 TEC 制冷模块及柔性电阻式加热薄膜的防护舱,

其与机械遮光板协同工作提升系统环境适应性。整个测量系统可通过 Modbus TCP 协议与紧缆机控制系统进行通信,实现数据实时传输与自动化协同测量。本文其余部分安排如下:第 2 节介绍空隙率测量的原理及误差分析,随后介绍环绕式结构光测量系统的总体架构及关键功能模块设计;第 3 节通过实验验证户外环境适应性子系统的性能、多相机标定与点云拼接精度,以及集成系统的主缆截面测量精度;第 4 节结合实验结果对本文工作进行总结,并讨论系统的后续优化方向。

2 空隙率测量原理与系统架构设计

2.1 空隙率测量原理

主缆由大量高强钢丝或预制平行钢丝索股构成。索股架设后截面难以自然成圆,外轮廓及内部钢丝排列存在离散性,需通过紧缆工艺径向压实,使其形成近圆形整体截面,以提高密实度和圆整度。主缆空隙率定义为非钢丝空隙截面积占主缆外轮廓总截面积的比例。以 A_c 表示紧缆后主缆外包络截面积,以 A_s 表示截面钢丝总截面积,则空隙率 η 可定义为:

$$\eta = \frac{A_c - A_s}{A_c}, \quad (1)$$

其中: $A_c - A_s$ 为空隙面积,当以百分数表示空隙率时, η 的计算结果再乘以 100%。钢丝总截面积 A_s 由主缆设计参数确定。对于单一规格钢丝,设钢丝根数为 n ,单丝直径为 d ,则:

$$A_s = n \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2)$$

空隙率测量的关键在于获得准确、完整的主缆外包络截面积 A_c 。由公式(1)可知,测量截面面积误差会直接传递至空隙率结果。将 η 写为:

$$\eta = 1 - A_s/A_c. \quad (3)$$

对 A_c 和 A_s 进行一阶误差传播,可得:

$$\Delta \eta \approx \frac{A_s}{A_c^2} \Delta A_c - \frac{1}{A_c} \Delta A_s. \quad (4)$$

若钢丝根数与直径参数由设计文件确定, A_s 的不确定度相对较小,可近似认为 $\Delta A_s \approx 0$,则截面面积测量误差导致的空隙率绝对误差为:

$$\Delta \eta \approx \frac{A_s}{A_c^2} \Delta A_c = (1 - \eta) \frac{\Delta A_c}{A_c}. \quad (5)$$

公式(5)表明,在钢丝总截面积已知的前提下,空隙率误差主要由主缆外包络截面积测量误差决定,且空隙率测量的绝对误差小于主缆的外包络截面积测量误差。因此,本文后续实验通过多次重复测量验证 A_c 的测量精度来评价其误差对空隙率计算结果的影响。

2.2 测量系统总览

如图 1 和图 2 所示,紧缆机在户外施工时工作在悬索桥主缆上,面临着强光、高温及高湿度等户外挑战,并且测量系统需与紧缆机协同作业并实现实时测量。

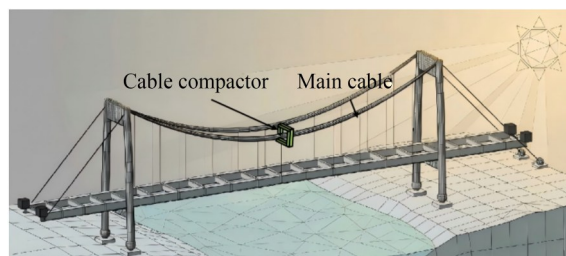


图 1 紧缆机工作场景

Fig. 1 Cable-tightening machine operation scenario

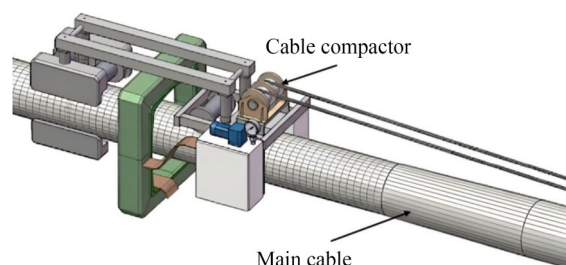


图 2 紧缆机工作近景图

Fig. 2 Close-up view of cable tightening machine

为此,本文设计了如图 3 所示的测量系统,图 3 中灰色圆柱体为主缆,是整套设备的定位基准,所有组件的动作、安装精度均围绕该工件的圆柱轴线设计。主缆穿过青蓝色刚性方形支架的中心,测量系统安装于刚性支架上,刚性支架可与紧缆机串联安装,实现与紧缆机实时协同作业。

测量系统将四台面结构光相机分别封装于独立的户外防护舱内,以 90° 等间隔安装于围绕主缆的刚性方形支架上。每个结构光相机的前方均配备折叠式机械遮光板,由步进电机驱动,随紧缆作业过程调整位置,并贴近主缆形成遮光区域,物理阻断外部直射光与散射光进入视场。

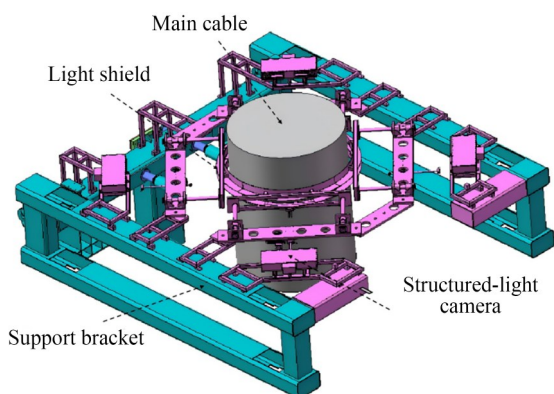


图3 测量系统架构图

Fig. 3 Architecture diagram of measurement system

四台面结构光相机对主缆的环绕式测量如图4所示,其通过基于公共视场结合张正友标定法将四相机标定到同一坐标系下。本文所使用的结构光相机为凌云光Y2000L面结构光相机,其成像单元曝光时间为1~100 ms可调,其中Z向检测配置为40~2 000 mm,X/Y向按工况调整ROI,点云点间距为0.7 mm,推荐工作距离1~2 m。相机通过千兆以太网与工控机连接,支持软件触发、GPIO硬触发及异步触发;结合SDK开发,在工控机上可以实现四相机异步触发采集并对采集的点云数据进行实时处理,实现与紧缆机的协同作业。

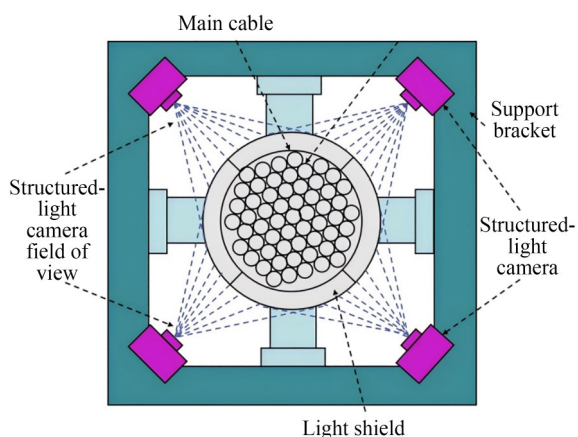


图4 环绕式测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wrap-around measurement

为确保四路面结构光相机可以完整采集主缆360°点云,本文针对单路结构光相机设计了主缆表面三维观测方案,如图5所示。

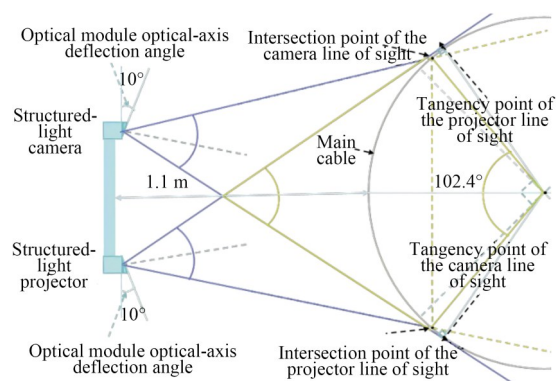


图5 单路相机视野图

Fig. 5 Field of view diagram of a single camera

紧缆全过程主缆外径由初始约1.55 m收束至最终约1.45 m;成像相机光心至主缆表面的最小工作距离设定为1.1 m,位于结构光相机1~2 m的推荐工作距离内。单目成像相机与光机的视场角均为55°,光轴均向内侧偏置约10°,其中可形成的有效点云捕获视场为成像视场与光机条纹投射视场的交集视场。在该空间几何配置下,单台相机可捕获的主缆圆柱面环向覆盖角约为102.4°,相邻相机之间形成圆心角约为12.4°的圆柱面重叠区域,从而实现主缆360°点云全覆盖采集。

2.3 户外防护性设计

本系统的目标应用场景为广东省内跨河海大桥主缆空隙率检测,现场户外环境具有强光照,高湿、高温及盐雾等典型滨海气候特征。根据珠江口海域历史气象条件,该区域年平均相对湿度约为78%~80%。在极端天气条件下,环境相对湿度可频繁达到95%,并常伴随35℃以上的高温。紧缆施工现场对条纹投影系统造成三类主要环境胁迫:超过 10^5 lux的直射太阳辐射,可淹没投影条纹并导致解码算法失效;高温环境对相机工作稳定性的影响,存在造成电子元器件永久损坏的风险;高湿诱发的光学视窗冷凝水雾,导致投影条纹散射而无法进行有效相位解算。

为应对上述三类环境胁迫,本文设计了环境适应性户外防护舱,防护舱内部组件设计布局如图6和图7所示。防护舱内配置TEC制冷模块、柔性电阻式防雾加热薄膜和干燥剂。面结构光相机通过安装底部螺栓固定于舱体内部底板,相机电源线、相机信号线及户外适应性组件供电线

均通过后面板密封接口引出。户外适应性组件供电线进入舱体后接入接线端子排,再由端子排分别为各功能组件供电,如图 6 俯视图中的淡蓝色线条所示(彩图见期刊电子版)。

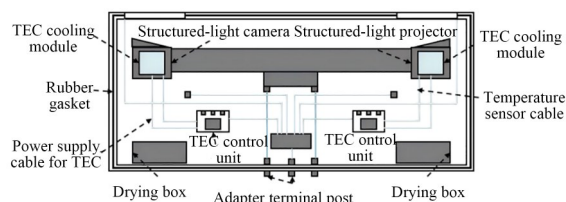


图 6 防护舱设计俯视图

Fig. 6 Top view of protective cabin design

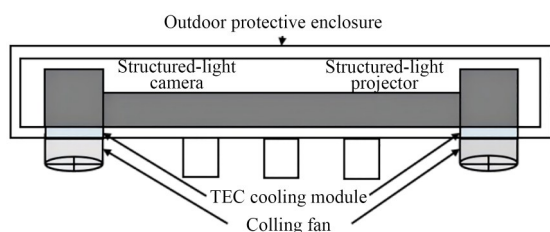


图 7 防护舱设计正视图

Fig. 7 Front view of protective cabin design

TEC 制冷模块在防护舱中的安装位置如图 7 所示,TEC 制冷单元嵌入防护舱铝型材中,位于结构光相机与光机投影仪的正下方,制冷单元冷端通过高导热硅脂与相机及投影仪壳体紧密耦合,热端则由鳍片-风扇强制对流散热组件进行散热。嵌入制冷单元内的热敏电阻传感器将温度信息反馈至 TEC 控制单元:当监测温度超过上限设定值时,TEC 控制单元启动制冷模块;当温度降至下限设定值时,系统停止制冷。该机制造使舱内温度在设计工况内稳定维持在 20~40℃的工作区间内。

柔性电阻式防冷凝加热薄膜通过在光学视窗内侧边缘贴附柔性电阻加热元件进行加热,利用焦耳热效应将视窗表面温度加热至高于环境露点温度 5℃以上,从热力学角度阻断水汽凝结。相较于被动式疏水涂层,该主动加热方案在不影响视窗透光率的前提下,可在 2 s 内完成除雾,响应速度显著更快。

为确保户外强光照条件下相机能够采集点云,在防护舱外配备了折叠式机械遮光板,其由步进电机驱动,安装于主缆测量区周围,安装位

置如图 3 测量系统架构图所示。在紧缆机作业时,遮光板展开后在主缆测量区域形成 360°环绕式阴影区。环境照度值可被遮光板从超过 10^5 lux 降低至 24 000 lux 以下,低于相机在 15 ms 曝光时间下的工作阈值,其有效性在第 3 节中予以量化验证。

3 实验验证

3.1 装置搭建

防护舱搭建的实物图如图 8 和图 9 所示。防护舱整体采用铝合金型材搭建,外表为银白色,有利于反射户外的太阳光避免吸热,降低舱内温度。防护舱前侧设计两个观察视窗,并为视窗配备了柔性电阻式加热薄膜。防护舱的各铝型材的板块之间通过多个螺丝进行固定接紧,接缝处设置了硅橡胶密封圈保证防护舱的密封性。

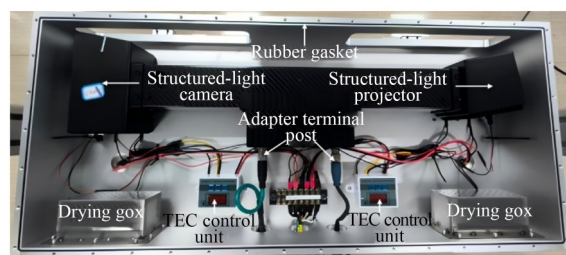


图 8 防护舱实物俯视图

Fig. 8 Top view of physical protective cabin

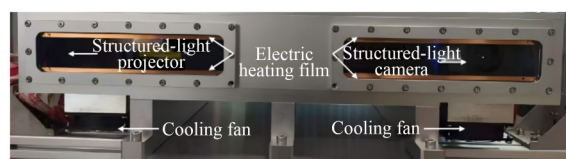


图 9 防护舱实物正视图

Fig. 9 Front view of physical protective cabin

3.2 加热膜视窗防雾实验

在高湿度条件下,当视窗玻璃表面温度低于环境空气露点温度时,视窗表面发生冷凝并形成水雾。视窗起雾会降低结构光条纹的投射质量,其影响如图 10 和图 11 所示。当视窗无雾时,光机投射的编码光束能够规整地投射到主缆表面,并形成清晰、连续的相位条纹;当视窗起雾时,编码光束在通过视窗时发生明显散射,投射到主缆表面的结构光条纹变得模糊、破碎,难以形成稳

定的相位分布,进而导致解相算法失效,无法获取有效的点云数据。两种状态下采集得到的主缆点云如图 12 和图 13 所示。由图 13 可见,视窗起雾状态下相机所采集点云存在大范围缺失,难以满足主缆三维重建与截面分析的要求。

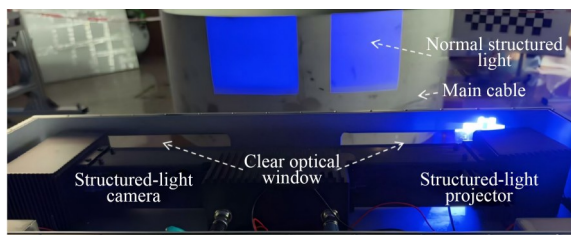


图 10 无雾视窗

Fig. 10 Fog-free optical window

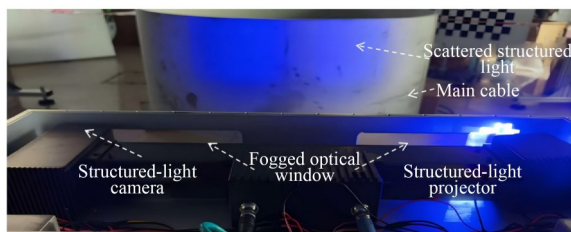


图 11 起雾视窗

Fig. 11 Fogged optical window



图 12 视窗正常采集点云

Fig. 12 Point cloud acquisition with clear viewing window



图 13 视窗起雾采集点云

Fig. 13 Point cloud acquisition with fogged viewing

为验证防护舱视窗除雾设计的有效性,本文开展了水雾模拟实验。实验时环境温度为 25℃,相对湿度为 54%。考虑到实验室环境相对湿度低于桥址极端高湿工况,本文采用水雾发生装置对视窗表面施加水蒸气,以模拟高湿环境下视窗玻璃表面发生凝水结露的状态。该水雾发生装置基于热蒸发式雾化原理工作,通过电加热元件将液态水加热至饱和沸腾状态,使其相变为高温饱和水蒸气;随后由电机驱动的强制送风系统将

水蒸气输送至光学视窗表面。水蒸气与温度较低的视窗玻璃接触后发生冷凝,从而在视窗表面形成分布较为均匀的水雾层。

在此基础上,本文进一步对加热薄膜的除雾性能进行量化测试。实验中分别记录加热薄膜激活与未激活两种状态下视窗表面水雾消散所需时间,测量结果如表 1 所示。通过该实验,可定量评估加热薄膜对视窗结露问题的抑制能力,并验证防护舱在高湿凝露工况下维持结构光成像质量和点云采集稳定性的有效性。

表 1 加热膜工作效果对比表

Tab. 1 Comparison table of heating film performance

水雾温度/℃	加热膜是否工作	除雾耗时/s
45	否	50
45	是	2
40	否	40
40	是	1.5

由表 1 可知,在未启用加热薄膜时,视窗表面水雾主要依靠自然蒸发消散。当水雾温度为 45℃时,除雾耗时为 50 s;当水雾温度为 40℃时,除雾耗时为 40 s,说明自然蒸发难以及时恢复视窗的光学透过状态。启用加热薄膜后,视窗除雾时间明显缩短。当水雾温度为 45℃时,除雾耗时由 50 s 缩短至 2 s;当水雾温度为 40℃时,除雾耗时由 40 s 缩短至 1.5 s。与未加热状态相比,除雾耗时降低约 96%,除雾效率提升约 25 倍以上。实验结果表明,加热薄膜能够快速提高视窗表面温度至 50~55℃,使其高于水蒸气冷凝所需的露点条件,从而加速冷凝水雾蒸发并抑制水雾持续附着。在本实验条件下,未观察到加热薄膜工作对结构光投射质量和点云采集完整性及质量产生明显不利影响。

3.3 TEC 制冷实验

本实验旨在量化验证 TEC 制冷模块的制冷效果,并明确不同环境温度下相机及投影光机的工作温度变化。实验通过将防护舱外部环境温度分别加热至 40℃,45℃和 50℃,模拟户外高温工况,并同步监测相机与投影光机壳体温度,以定量评估 TEC 制冷模块对结构光相机及投影光机的制冷效能。同时,将未启用 TEC 制冷模块

时相机与投影光机的工作温度作为对照。实测结果汇总于表 2。

表 2 TEC 制冷系统工作效果对比表

Tab. 2 Comparison table of TEC cooling system performance

(℃)

环境温度	未启用 TEC	启用 TEC
50	54	39
45	50	35
40	46	30

由表 2 可知,在测试工况下,TEC 制冷模块能够将防护舱内部关键器件温度稳定维持在 30~40℃内。与未启用 TEC 制冷模块的工况相比,该模块可使相机与投影光机温度降低约 15℃,有效降低了防护舱内积热导致器件损伤的风险,验证了其在户外高温环境下的温控有效性。

3.4 户外遮光实验

为验证机械遮光板在户外环境中的实际遮光效果,在室内受控条件下开展相机工作照度阈值测定实验。实验采用中心照度可调光源和照

度仪,通过调节可调光源的中心照度,确定相机在标称曝光时间为 15 ms 时的有效工作照度上限为 24 000 lux。如图 14 所示,当被采集区域照度超过该阈值时,点云数据会出现明显缺失。在 28 000 lux 和 32 000 lux 工况下,光照中心区域采集的点云出现数据空洞,表明相机在强直射光照条件下会发生编码解算失效。

为验证户外环境下机械遮光方案的可行性,采用照度仪在光照强度较高的气象条件下开展现场实测,以测定遮光板阴影区的照度值,并验证相机是否能够正常采集点云,测量结果汇总于表 3。由表 3 可知,所有测试条件下的直射太阳光照度均超过相机 24 000 lux 的工作阈值,而机械遮光板阴影区照度均被有效降低至 10 000 lux 以下,使相机能够恢复完整点云采集。为进一步验证户外强光照条件下相机与遮光板的协同工作效果,在约 10⁵ lux 照度条件下开展现场实地验证,结果如图 15 所示。遮光板阴影覆盖区域能够完整采集点云,而阳光直射区域未能有效采集点云,进一步验证了机械遮光方案在户外强光环境下的可行性。

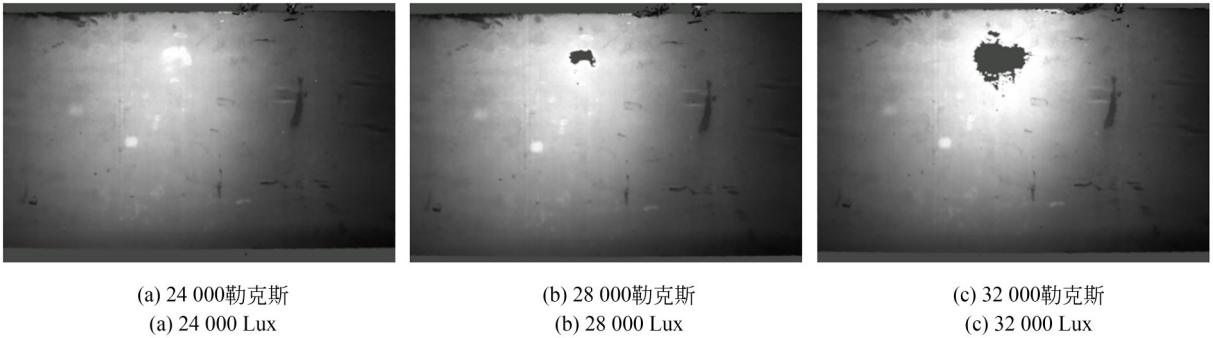


图 14 不同照度相机采集点云对比图

Fig. 14 Comparison diagram of point cloud acquisition under different illuminance values

表 3 户外光照强度记录表

Tab. 3 Outdoor light intensity record sheet

天气	时段	被测点光照情况	照度值/lux	结构光相机是否能采集点云
晴(无云)	10:00	阳光直射	95 000~120 000	否
晴(无云)	10:00	遮光板阴影	4 500~6 000	是
晴(无云)	12:00	阳光直射	150 000~180 000	否
晴(无云)	12:00	遮光板阴影	8 000~10 000	是
晴(无云)	15:00	阳光直射	110 000~130 000	否
晴(无云)	15:00	遮光板阴影	5 500~6 500	是

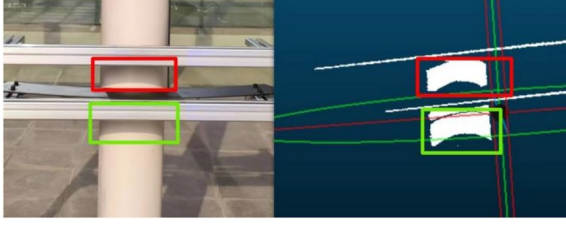


图 15 遮光板户外验证

Fig. 15 Outdoor verification of light shield

3.5 多相机标定

在完成户外防护舱环境适应性功能验证后, 将其与结构光相机进行集成, 然后需要将四结构光相机独立采集的点云精确配准至统一的全局坐标系。由于主缆表面缺乏显著几何与纹理特征且钢丝排列存在周期重复性, 难以实现基于特征点的主缆点云配准。为保障主缆三维重建精度, 本文采用张正友平面棋盘格标定法对四相机进行全局外参标定, 外参标定原理图如图 16 所示。

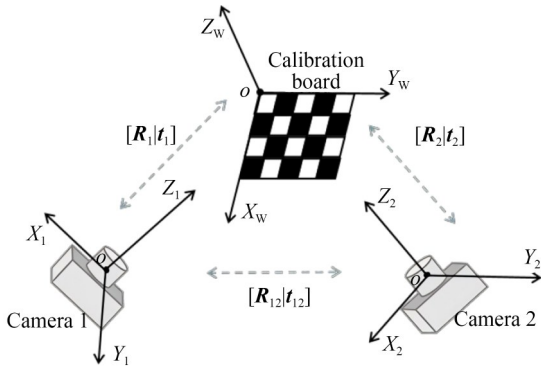


图 16 外参标定示意图

Fig. 16 Schematic diagram of external parameter calibration

设空间点的世界坐标为 $M_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$, 其图像投影坐标为 $m = [u, v]^T$, 针孔成像模型描述为::

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_A [r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中: A 为内参矩阵, $[R|t]$ 为外参矩阵。令棋盘格平面位于 $Z_w = 0$ 处, 三维投影退化为平面单应性映射 $s\tilde{m} = H\tilde{M}$, 单应性矩阵 H 满足:

$$H = \lambda A [r_1 \ r_2 \ t]. \quad (7)$$

在内参 A 已预标定的前提下, 利用旋转矩阵正交约束可从 H 逐幅解算外参初值:

$$r_1 = \frac{1}{\lambda} A^{-1} h_1, r_2 = \frac{1}{\lambda} A^{-1} h_2, t = \frac{1}{\lambda} A^{-1} h_3. \quad (8)$$

其中: $\lambda = \|A^{-1} h_1\| = \|A^{-1} h_2\|$, $r_3 = r_1 \times r_2$; 随后对 R 进行奇异值分解以强制施加正交性约束。将棋盘格置于相邻相机的视场重叠区内, 设两相机分别对应外参 $[R_1|t_1]$ 与 $[R_2|t_2]$, 则两相机间相对位姿的代数初值为:

$$R_{12} = R_2 R_1^T, t_{12} = t_2 - R_2 R_1^T t_1. \quad (9)$$

以上代数初值通过以下 Levenberg-Marquardt (LM) 算法最小化联合重投影误差进行非线性精化。

定义单点的重投影误差为:

$$e_{i,k,j} = \|m_{i,k,j} - \hat{m}(A_i, R_{1i}, t_{1i}, R_{2i}, t_{2i}, M_j)\|^2, \quad (10)$$

其中: $m_{i,k,j}$ 为第 i 台相机在第 k 幅标定图像中检测到的第 j 个棋盘格角点像素坐标, $\hat{m}(\cdot)$ 为由当前内外参模型将对应空间角点 M_j 投影到图像平面后得到的预测像素坐标。则整个棋盘格中所有角点的联合重投影误差可以写为:

$$E_{12} = \sum_{i \in \{1,2\}} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \delta_{i,k,j} e_{i,k,j}, \quad (11)$$

其中: $\delta_{i,k,j}$ 为可见性指示变量, 当该角点对应在对应图像中被有效检测时取 1, 否则取 0。因此, 单点重投影残差本质上是观测像素点与模型预测像素点之间的二维欧氏距离平方。为突出基于实际棋盘格图片中标定的解算过程, 以上公式对应的像素域均方根重投影误差 ϵ_{px} 可表示为:

$$\epsilon_{px} = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_k \sum_j \delta_{i,k,j} \|m_{i,k,j} - \hat{m}_{i,k,j}\|^2}{\sum_i \sum_k \sum_j \delta_{i,k,j}}}, \quad (12)$$

其中: ϵ_{px} 的单位为 pixel, 为本文评价标定精度的重投影误差, 其反映标定参数对图像角点观测的拟合程度。图像像素域重投影误差与空间配准误差之间存在间接关系: 像素残差越小, 说明内外参模型预测的角点位置与实际观测值越吻合, 外参估计精度越高, 相邻相机点云变换至同一坐标系的刚体位姿偏差也越小^[29]; 空间点云配准误差是外参误差在三维点云上的直接反映。若相邻相机外参存在旋转误差 ΔR 和平移误差 Δt , 则空间点 P 经坐标变换后的配准偏差可近似表示为:

$$\Delta P \approx \Delta R P + \Delta t. \quad (13)$$

公式(13)表明,点云空间配准误差不仅与标定重投影误差有关,还与被测点到相机坐标系原点的距离、点云深度测量误差、采样密度、相邻视场重叠范围和表面法向估计等因素有关。此外,引入点云配准算法也是降低空间配准误差的重要途径,如通过改进的ICP^[30]算法实现点云的精确配准与优化。

本文将重投影误差作为外参标定质量的图像测量指标,同时进一步采用重叠区域法向拼接间隙对最终点云融合后的空间配准效果进行独立评价。

在实际应用场景的标定中,标定选用高精度棋盘格标定板,其尺寸为1 000×800 mm,棋盘格边长为65 mm,角点阵列为7×10,如图17所示。

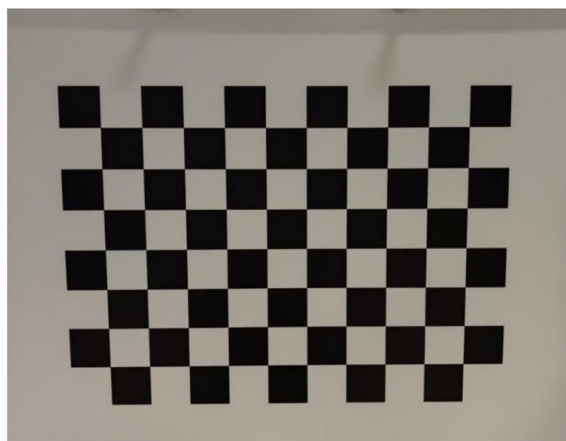


图 17 棋盘格标定板

Fig. 17 Checkerboard calibration target

测量系统中心直径为1.5 m的圆形区域为相邻相机的共视测量区。四台结构光相机光轴高度与棋盘格中心高度保持一致,标定板的布设如图18所示。

标定过程中,标定板始终布设在该共视区域内,并保证同一姿态下至少能够被相邻两台相机同时完整观测,从而建立相邻相机之间的共视几何约束。为保证角点识别精度,标定板在各相机图像中的成像面积占比应大于50%,且棋盘格边缘不应超出图像范围或图像边界。

具体标定流程为标定板首先放置于共视区域中心位置,随后在该区域内沿水平和竖直方向平移,并在不同位置绕自身中心旋转,适当改变

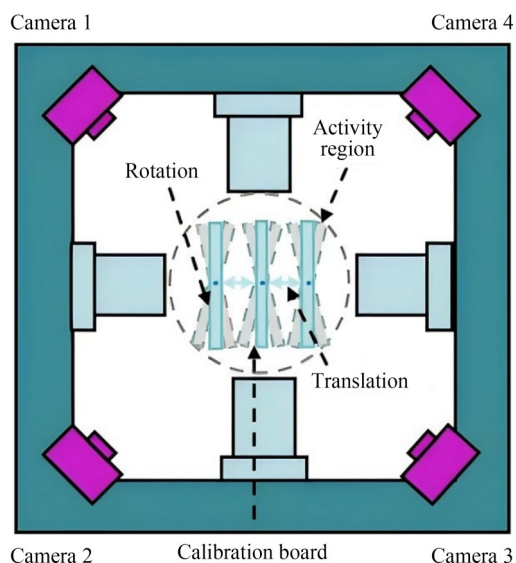


图 18 标定板布设位姿

Fig. 18 Calibration target placement poses

板面与相机光轴夹角,使角点覆盖图像中心及边缘区域,形成多位置、多姿态的共视标定图像。相邻相机多次触发采集同一位姿的棋盘格图像,并保存多组不同位姿的标定图像,以用于后续外参解算。外参计算基于OpenCV库对棋盘格标定图像进行亚像素级角点提取,提取结果如图19所示。图中所示为经核验后的角点可视化结果,确认角点提取准确无误后,将其用于后续多相机外参解算。

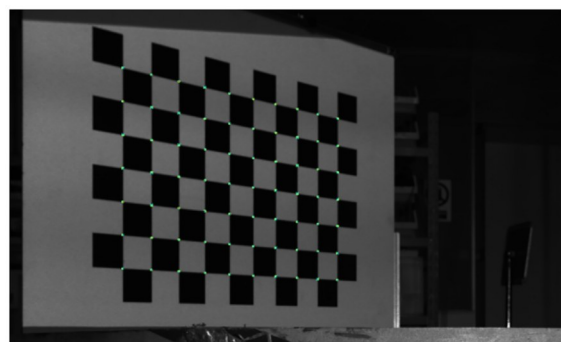


图 19 标定板角点提取结果

Fig. 19 Checkerboard corner extraction results

随后,根据棋盘格的行列角点数和实际方格尺寸,构建位于同一平面上的三维世界坐标点集。将三维棋盘格角点与左右图像中的二维角点对应后,在左右相机内参和畸变参数已知并固定的条件下,采用双目标定算法求解两相机之间

的相对旋转矩阵和平移向量,同时获得本质矩阵、基础矩阵及重投影误差。最后,根据双目标定结果计算双目极线校正参数,并将旋转矩阵和平移向量组合为 4×4 齐次变换矩阵,用于后续坐标转换和三维重建。

多坐标系对齐融合流程如图 20 所示,系统对具有重叠视场或共同标定约束的相邻相机对分别进行外参求解并通过最小化双目重投影误差进行 LM 非线性精化。随后,以相机 1 坐标系作为全局参考坐标系,对相机 2 和相机 4 采用直接外参变换实现坐标统一;对不具备直接重叠视场的相机 3,则通过相机 3 至相机 4、相机 4 至相机 1 的位姿链乘完成间接配准。该方法利用相邻相机间的局部高精度标定结果构建全局刚性坐标关系,可有效解决多相机系统中视场不完全重叠条件下的空间对齐问题。

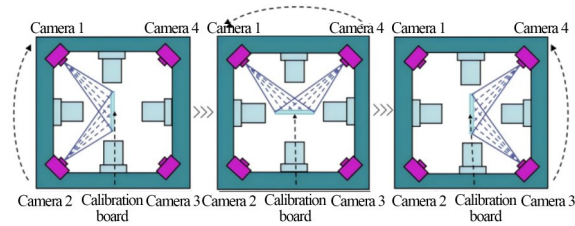


图 20 多相机标定流程图

Fig. 20 Flowchart of multi-camera calibration

相邻两相机之间的标定平均重投影误差收敛至 0.7 pixel 以内。将标定所得外参矩阵用于统一四路相机坐标系得到实体主缆模型的点云数据,其扫描所得全截面点云融合结果如图 21 所示。

由图 21 可知,系统实现了主缆点云 360° 全方位采集重建,主缆表面点云连续无缺失,融合边界处未见明显数据空洞或阶跃错位。对相邻相机点云重叠区域的拼接间隙进行定量评估,结果表明,相邻相机点云重叠区域的法向配准误差处于毫米级范围,平均点云拼接间隙为 1.5~2.0 mm,为后续截面轮廓提取与空隙率计算提供了可靠的数据基础。

为进一步评估系统的截面测量稳定性,本文对主缆截面积进行了多次人工测量以及点云测量,所得主缆点云的截面分析结果如表 4 和表 5 所示。

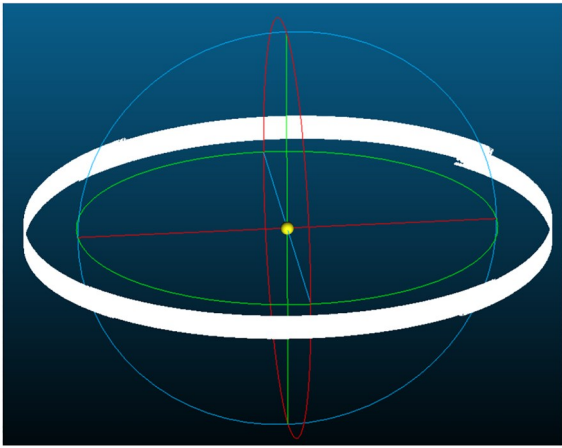


图 21 完整主缆点云

Fig. 21 Complete point cloud of main cable

表 4 人工测量结果

Tab. 4 Manual measurement results

次数	参考 真值/ m^2	人工 测量/ m^2	绝对 误差/ m^2	相对 误差
1	1.780 71	1.848 16	0.067 45	3.787 8%
2	1.780 71	1.823 34	0.042 63	2.394 0%
3	1.780 71	1.809 81	0.029 10	1.634 2%
4	1.780 71	1.731 97	0.048 74	2.737 1%
5	1.780 71	1.715 68	0.065 03	3.651 9%

表 5 点云测量结果

Tab. 5 Point cloud measurement results

次数	参考 真值/ m^2	点云 测量/ m^2	绝对 误差/ m^2	相对 误差
1	1.780 71	1.776 35	0.004 36	0.244 8%
2	1.780 71	1.776 51	0.004 20	0.235 9%
3	1.780 71	1.775 73	0.004 98	0.279 7%
4	1.780 71	1.776 31	0.004 40	0.247 1%
5	1.780 71	1.776 24	0.004 47	0.251 0%

表 4 和表 5 分别给出了人工测量方法与本文点云测量方法得到的主缆截面积结果。表中“参考真值”为采用第三方点云处理软件 CloudCompare 对经后处理的高精度主缆点云进行截面面积计算得到。该参考点云经过点云去噪、离群点剔除、配准误差修正及截面轮廓优化等处理,以尽可能降低点云采集噪声、拼接误差和局部异常点对截面面积计算结果的影响。因此,本文将其作为主缆截面积测量结果的高精度参考值,用于评价不同测量方法的测量精度。

由表 4 可知,人工测量得到的主缆截面积分布为 $1.715\ 68\sim 1.848\ 16\ \text{m}^2$,最大波动幅值为 $0.132\ 48\ \text{m}^2$ 。相对于参考值 $1.780\ 71\ \text{m}^2$,人工测量方法的绝对误差为 $0.029\ 10\sim 0.067\ 45\ \text{m}^2$,相对误差为 $1.634\ 2\%\sim 3.787\ 8\%$,平均绝对误差约为 $0.050\ 59\ \text{m}^2$,平均相对误差约为 2.841% 。这是由于实际紧缆后的主缆截面并非理想圆形,其截面轮廓存在一定椭圆度及局部形态偏差。人工测量通常只能在有限角度方向上测量截面直径,并基于理想圆截面假设反算截面积,因此测量结果容易受到测量角度选择、截面非圆特征和人工读数误差的影响,难以稳定表征主缆截面的真实几何特征。

由表 5 可知,本文点云测量方法得到的截面积分布为 $1.775\ 73\sim 1.776\ 51\ \text{m}^2$,最大波动幅值仅为 $0.000\ 78\ \text{m}^2$,明显小于人工测量结果的波动范围。与参考真值相比,本文方法多次测量的绝对误差均小于 $0.005\ \text{m}^2$,相对误差均小于 0.3% ,平均绝对误差约为 $0.004\ 48\ \text{m}^2$,平均相对误差约为 $0.251\ 7\%$ 。相比人工测量方法,本文方法能够基于主缆全周向点云轮廓进行截面积解算,避免了有限直径测量和理想圆截面假设带来的误差,更充分地反映了主缆截面的实际几何形态。实验结果表明,本文所提出的多相机结构光测量方法具有更好的重复性和截面积测量精度,可为后续主缆空隙率计算提供精确可靠的主缆外包络截面积。

本文采用截面测量方法为基于主缆轴向的截面分析方法,主缆截面分析结果如图 22 所示。

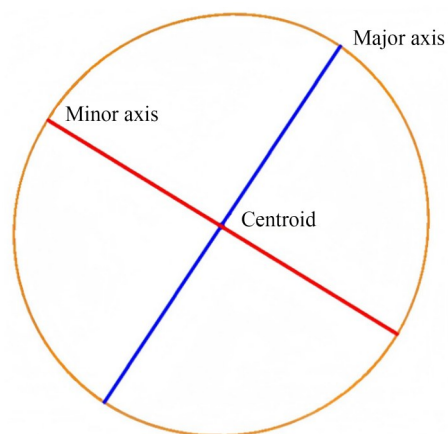


图 22 主缆截面分析图

Fig. 22 Analysis diagram of main cable cross-section

截面分析算法首先基于随机采样一致性算法提取主缆点云的轴线方向;随后,将主缆点云沿轴线方向投影至与主缆轴线垂直的截面平面上,并在该平面内构建极坐标系,对截面点云进行极坐标序列化处理;最后,根据序列化后的截面轮廓点计算截面积,从而获得主缆截面分析结果。在此基础上,系统还可进一步提取过质心长轴、短轴及椭圆度等截面几何参数,为主缆紧缆过程中的空隙率控制与截面形态保持提供定量依据。

4 结 论

本文提出并研制了一种面向主缆空隙率评估的户外自适应环绕式条纹投影结构光测量系统。在系统架构上,本文以 90° 等间隔布置四台面结构光相机,并采用基于视场重叠约束的多相机全局外参标定方法,实现四台相机坐标系的统一和主缆 360° 全截面点云重建。在环境适应性设计上,集成了折叠式机械遮光板、TEC 制冷模块及柔性电阻式视窗加热薄膜,显著降低了户外严苛环境对面结构光相机点云采集的干扰。

第 3 节的实验验证表明,本系统成功克服了户外工况的限制,在高达 $10^5\ \text{lux}$ 的直射光照、 $50\ ^\circ\text{C}$ 高温及高湿凝雾环境下均能稳定运行并获取高质量的三维点云。系统标定与测量结果表明,相机标定的平均重投影误差低于 $0.7\ \text{pixel}$,主缆点云实现了毫米级拼接;经截面分析算法测得的主缆截面积与参考值相对误差稳定在 0.3% 以内,由公式(5)可知,空隙率测量误差小于截面积相对误差,且在 0.3% 以内。综上所述,本研究在仪器系统层面有效解决了户外高精度三维测量面临的部署与环境难题,拓展了面结构光技术在户外施工测量场景中的应用,并且其毫米级的主缆点云拼接精度及高精度的截面测量精度满足主缆紧缆施工的要求,为主缆空隙率的自动化精密定量评估提供了坚实的技术支撑。

未来工作可从工程实测试验验证与方法稳定性增强两方面推进。首先,在工程实测试验验证方面,后续将进一步开展实地施工场景下正在紧缆作业的主缆空隙率动态测试,将测量系统与紧缆机进行现场联动,评估系统在紧缆机行走、主缆截

面持续收束、现场振动及环境光照变化等动态工况下的点云采集稳定性、截面测量重复性和空隙率计算精度。同时,可将本系统拓展至更多户外大型构件的高精度尺寸测量与三维形貌重建任务,如主缆全线线形监测、缆索表面形貌检测及表面缺陷定量识别等。

其次,在方法稳定性增强方面,针对施工现场中可能存在的标定板部分遮挡、光照突变、视场受限及相机观测角度变化等复杂工况,后续将进一步研究基于 ChArUco 标定板的鲁棒多相机标定方法。ChArUco 标定板结合了棋盘格角点定位精度高和 ArUco 标志编码可识别性强的优势,在标定板局部遮挡或部分角点不可见的情况下,仍可通过可见标志块建立稳定的角点对应关系,从而提升多相机外参标定的可靠性。进一步地,可结合深度学习特征检测与外参全局优化策

略,提高复杂施工环境下角点检测、相机位姿估计和点云融合的精度与稳定性。

作者贡献说明:

罗 利:实验方法设计,系统搭建,数据分析,论文构思与撰写;

马 瑞:实验方法设计,系统搭建与数据分析;

邹易清:实验原理设计,实验资源统筹,论文审核;

张 皓:机械结构设计,实验资源协助;

王跃学:实验方法设计,现场测量系统硬件设计与搭建;

王晓浩:论文审核,项目管理;

李星辉:实验原理与方法设计,实验指导,论文构思与审核,项目管理。

参考文献:

- [1] 李鹏. 悬索桥主缆腐蚀问题浅析:中国腐蚀与防护学会. 2018 第五届海洋材料与腐蚀防护大会暨海洋新材料及防护新技术展览会论文集[C]. 中交公路规划设计院有限公司, 2018: 44-48.
LI P. Brief Analysis on Corrosion of Main Cables of Suspension Bridges: Chinese Society for Corrosion and Protection. Proceedings of the 5th 2018 National Conference on Marine Materials and Corrosion Protection & Exhibition of New Marine Materials and Advanced Protection Technologies [C]. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., 2018: 44-48. (in Chinese)
- [2] 段瑞芳, 杜善朋, 李彩霞. 大跨度悬索桥主缆线形影响参数分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(4): 888-891.
DUAN R F, DU S H P, LI C X. Analysis of the parameters having influences on geometry of main cable of long-span suspension bridge [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2015, 39(4): 888-891. (in Chinese)
- [3] RASHIDI M, MOHAMMADI M, KIVI S S, *et al.* A decade of modern bridge monitoring using terrestrial laser scanning: review and future directions [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3796.
- [4] MA Z L, LIU S L. A review of 3D reconstruction techniques in civil engineering and their applications [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2018, 37 (C): 163-174.
- [5] 齐亚辉, 蔺鹏臻. 点云技术在土木工程中的应用现状综述 [J/OL]. 工程力学, 1-23 [2026-04-14]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250930.0901.004>.
QI Y H, LIN P Z H. Review on application status of point cloud technology in civil engineering [J/OL]. *Engineering Mechanics*, 1-23 [2026-04-14]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250930.0901.004>. (in Chinese)
- [6] 韩氏, 张琛萍, 张宗华, 等. MEMS 振镜式结构光三维重建综述[J]. 光学精密工程, 2025, 33(7): 1065-1090.
HAN M, ZHANG C H P, ZHANG Z H, *et al.* Review of MEMS vibration-mirror-based 3D reconstruction of structured light [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(7): 1065-1090. (in Chinese)
- [7] LI Y R, DAN D H, PAN R Y. Identification of global main cable line shape parameters of suspension bridges based on local 3D point cloud [J]. *Low-Carbon Materials and Green Construction*, 2025, 3(1): 1.
- [8] ZHU Y J, LI M X, XIONG W. Research on long-span bridge point cloud morphology identification [J]. *e-Journal of nondestructive testing*. 2024.

- [9] ZHOU Y, ZHU J Y, ZHAO L D, *et al.* High-precision monitoring method for bridge deformation measurement and error analysis based on terrestrial laser scanning[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(13): 2263.
- [10] ZHOU P, XU K, WANG D D. Rail profile measurement based on line-structured light vision[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 16423-16431.
- [11] LUO Q L, ZHANG S B, CHEN Z Y. Line structured light measurement system, method and experiments for rail profile[C]. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Automation, Information and Computing*. December 9-11, 2022. Beijing, China. SCITEPRESS -Science and Technology Publications, 2022: 162-168.
- [12] CHANG H, LI D Y, ZHANG X Y, *et al.* Real-time height measurement with a line-structured-light based imaging system[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 368: 115164.
- [13] IGAUE T, HAYAMIZU T, YOSHIDA K, *et al.* Pose adjustment considering linear cross-section continuity of line-structured light-based 3D tunnel measurements[C]. 2023 *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. January 17-20, 2023, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2023: 1-7.
- [14] CHEN R M, LI Y M, XUE G P, *et al.* Laser triangulation measurement system with Scheimpflug calibration based on the Monte Carlo optimization strategy[J]. *Optics Express*, 2022, 30(14): 25290.
- [15] LI J X, ZHOU Q, LI X H, *et al.* An improved low-noise processing methodology combined with PCL for industry inspection based on laser line scanner[J]. *Sensors*, 2019, 19(15): 3398.
- [16] WANG R X, WANG Y N, DEVADIGA S, *et al.* Structured-light three-dimensional scanning for process monitoring and quality control in precast concrete production[J]. *PCI Journal*, 2021, 66(6): 17-32.
- [17] WANG C, GAO F Y, CUI B B, *et al.* Geometric quality assessment of precast concrete (PC) elements based on 3D structural light scanning[J]. *Architectural Engineering and Design Management*, 2024, 20(2): 303-319.
- [18] ZHAO S, LIU C, ZHANG J. Building component deformation tracking using structured light technique[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023, XLVIII-2/W3-2023: 269-274.
- [19] DAI M L, WANG X R, CHENG C, *et al.* Efficient evaluation of concrete fracture surface roughness using fringe projection technology[J]. *Materials*, 2023, 16(12): 4430.
- [20] CHU C, YANG H L, WANG L B. Design of a pavement scanning system based on structured light of interference fringe[J]. *Measurement*, 2019, 145: 410-418.
- [21] WANG H, ZHANG C B, QIAN X, *et al.* HDRSL net for accurate high dynamic range imaging-based structured light 3D reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2025, 34: 5486-5499.
- [22] HUANG H Z, LI Y M, ZHANG Z Y, *et al.* Deep learning-enabled phase error correction in structured light 3D measurement systems for over-exposure, non-linearity, and textured scenes[J]. *Expert Systems with Applications*, 2026, 315: 131679.
- [23] HAN M, JIANG H, LEI F X, *et al.* Modeling window smoothing effect hidden in fringe projection profilometry[J]. *Measurement*, 2025, 242: 115852.
- [24] BAI Y J, ZHANG Z H, FU S, *et al.* Recent progress of full-field three-dimensional shape measurement based on phase information[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2024, 7(1): 9.
- [25] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [26] NI T Y, WANG L Q, YIN X F, *et al.* Experimental study on measuring and tracking structural displacement based on surveillance video image analysis[J]. *Sensors*, 2024, 24(2): 601.
- [27] LEE G, KIM S, AHN S, *et al.* Vision-based cable displacement measurement using side view video[J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 962.
- [28] ZHANG X B, LUO L, MA R, *et al.* Binocular stereo vision-based structured light scanning system calibration and workpiece surface measurement accuracy analysis[J]. *Sensors*, 2025, 25(20): 6455.
- [29] LI Y M, LI Z N, LIANG X J, *et al.* Global phase

accuracy enhancement of structured light system calibration and 3D reconstruction by overcoming inevitable unsatisfactory intensity modulation [J]. *Measurement*, 2024, 236: 114952.

- [30] 蔡引娣, 王宇轩, 牛超, 等. 基于改进 ICP 算法的大尺寸焊接构件三维形貌测量[J]. *光学精密工*

程, 2025, 33(9): 1396-1406.

CAI Y D, WANG Y X, NIU CH, *et al.* Improved ICP algorithm-based 3D morphology measurement of large-size welded components[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33 (9) : 1396-1406. (in Chinese)

作者简介:



罗 利(2001—),男,湖南永州人,硕士研究生,2024年于中国人民解放军国防科技大学获得学士学位,主要从事点云拼接,三维缺陷检测方面的研究。E-mail: luo-l24@mails. tsinghua. edu. cn

通讯作者:



李星辉(1985—),男,河南洛阳人,副教授,2008年于武汉大学获得学士学位,2011年于西安交通大学获得硕士学位,2014年于日本东北大学获得博士学位,主要从事智能仪器、精密测量、计算机视觉和机器视觉等方面的研究。E-mail: li. xinghui@sz. tsinghua. edu. cn