DOI:10.14188/j.2095-6045.20260479

文章编号:2095-6045(2026)05-0090-08

复杂工程环境下基础设施形变视觉监测方法与误差控制

朱　松[1,2,3,4]　孟凡一[5]　朱家松[1,2,3]　华远盛[1,2]　李清泉[1,2]

1 深圳大学土木与交通工程学院,广东 深圳 ,518060

2 深圳大学广东省城市空间信息工程重点实验室,广东 深圳 ,518060

3 深圳大学极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室,广东 深圳 ,518060

4 深圳市智源空间创新科技有限公司,广东 深圳 ,518057

5 香港理工大学,香港 ,999077

Visual Monitoring Methods and Error Control for Infrastructure Deformation in Complex Engineering Environments

ZHU Song[1,2,3,4]　*MENG Fanyi*[5]　*ZHU Jiasong*[1,2,3]　*HUA Yuansheng*[1,2]　*LI Qingquan*[1,2]

1 College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

2 Guangdong Key Laboratory of Urban Informatics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

3 National Key Laboratory of Green and Longevity Road Engineering in Extreme Environments, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

4 Zhiyuan Space Innovation Technology, Shenzhen 518057, China

5 The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China

摘　要:基础设施建设正从规模扩张转向增量建设与存量养护并重,桥梁、隧道、大坝等大型结构的服役安全评估亟需连续、精密的形变观测手段。视觉测量通过相机连续获取序列影像并解算结构位移,具有非接触、多点同步、成本低等优势,但其实验室精度与外场长期精度之间存在差距,制约了该技术的常态化应用。本文综述了基础设施形变视觉监测的技术进展与工程应用,分析了复杂观测条件对测量结果的影响及其应对措施,指出了长期监测中环境适应性与基准稳定性方面的关键问题,并结合智能化与多源协同的发展,对该技术的研究方向和工程应用前景进行了展望。

关键词:视觉测量;形变监测;基础设施;非接触测量;多源协同;时空智能

中图分类号:P234;TU196

文献标志码:A

Abstract: Infrastructure construction is shifting from large-scale expansion towards a balance between new construction and the maintenance of existing assets. Assessing the service safety of bridges, tunnels, dams, and other large structures requires continuous and precise deformation observations. Vision-based measurement derives a sequence of images using a camera and calculates structural displacements, which offers advantages such as non-contact operation, multi-point synchronization, and low cost. However, differences between laboratory accuracy and long-term field accuracy limit its engineering application. This paper reviews technical advances in visual monitoring of infrastructure deformation and its engineering application. It examines the impact of complex observation conditions on measurement results and the corresponding countermeasures, identifies key issues concerning environmental adaptability and the stability of observation references in long-term monitoring. In light of developments in intelligent methods and multi-source collaboration, it provides an outlook on the research directions and engineering application prospects of this technology in light of developments in intelligent systems and, provided of this technology.

Key words: vision measurement; deformation monitoring; infrastructure; non-contact measurement; multi-source collaboration; spatiotemporal intelligence

我国基础设施建设正从规模扩张转向增量建设与存量养护并重。随着道路、桥梁、隧道和水库大坝等设施服役年限的持续增长,材料退化、荷载累积与环境侵蚀导致结构性能不断衰减,突发失效风险随之上升[1]。为保障基础设施服役安全,开展结构健康监测、及时发现结构退化与损伤累积导致的超限形变至关重要。

引用格式:朱松,孟凡一,朱家松,等. 复杂工程环境下基础设施形变视觉监测方法与误差控制[J]. 测绘地理信息,2026,51(5):90-97(ZHU Song, MENG Fanyi, ZHU Jiasong, et al. Visual Monitoring Methods and Error Control for Infrastructure Deformation in Complex Engineering Environments[J]. Journal of Geomatics,2026,51(5):90-97)

基金项目:国家自然科学基金(42401402,42671571)。

形变监测手段通常分为接触式和非接触式两类。接触式传感器直接安装在被测部位,无需远距离光学观测,结果稳定可靠,常用作检核基准[2]。然而,实际应用中受限于现场安全性和实施条件常无法布设,传感器网络与采集系统的安装维护也较烦琐,难以形成高密度测点[3,4]。因此,非接触测量以其可远距离、高精度测量形变的优势,成为基础设施安全运维领域的重要发展方向[3,4]。其中,测量机器人通过自动搜索并精确照准目标,由测角与测距解算测点的三维坐标,实现自动化形变监测。高精度全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)通过在测点架设卫星信号接收机,经相对定位解算测点位移。星载干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)利用重复轨道雷达影像的相位差反演地表形变,地基合成孔径雷达则通过主动微波观测获取视线向形变。三维激光扫描主动发射激光获取目标点云,通过不同时期点云的比较得到变形,使观测从点位扩展至面状区域[1]。

现有非接触测量方法已广泛用于基础设施形变监测,但在多点同步动态观测中仍存在一定局限。测量机器人依赖合作目标并逐点轮测,常规三维激光扫描难以同步获取整个测面的快速响应。高采样率GNSS可观测动态位移,但其精度受遮挡与多路径效应影响。星载InSAR受重访周期限制,地基干涉雷达虽可开展动态监测,但主要获取视线向分量[1,3]。视觉测量作为一种形变监测手段,以非接触、多点同步、时空分辨率高与影像可回溯等优势,被广泛用于基础设施形变监测。其通过相机对结构进行连续拍摄,所获序列影像经目标定位、运动估计与几何换算得到物理形变量,部分系统的位移分辨能力可达亚毫米量级[3]。

然而,视觉测量的高精度往往依赖稳定光照、短测距与静态观测平台等接近实验室的条件。在昼夜光照变化、长距离与强扰动观测环境中,各环节测量误差会相互耦合放大[4-6]。因此,提升外场条件下形变测量的准确性与可信度,是视觉测量工程应用的重要研究问题。本文梳理形变视觉监测的技术进展,分析其在工程现场面临的主要挑战与应对措施,结合典型工程讨论观测配置与适用条件,并展望发展方向。

1　视觉测量的技术发展

1.1　视觉测量系统

视觉测量系统通常由成像模组、镜头、边缘计算单元、通信模组和防护外壳组成,如图1所示。其中,成像模组普遍采用低噪声、高集成度的CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)图像传感器,具备较高的分辨率与采集帧率,可满足从准静态形变到动态振动的不同监测需求[4]。镜头通常根据监测距离和精度要求选择焦距,远距离高精度测量多选用长焦镜头,以获得足够的成像分辨率。针对难以正对目标的离轴观测,可选用倾斜移轴镜头,通过调整镜头与像面的相对位置及姿态,改善倾斜目标面的成像清晰度[7]。

考虑到实时监测对数据传输的要求,系统可内置边缘计算单元,在前端完成图像特征提取与位移解算,减少通信传输量。测量系统可固定于稳定墩台,也可直接搭载在被测结构上,或随可移动测站沿测线布设,便于在不具备稳定观测条件的场合开展监测工作[3]。

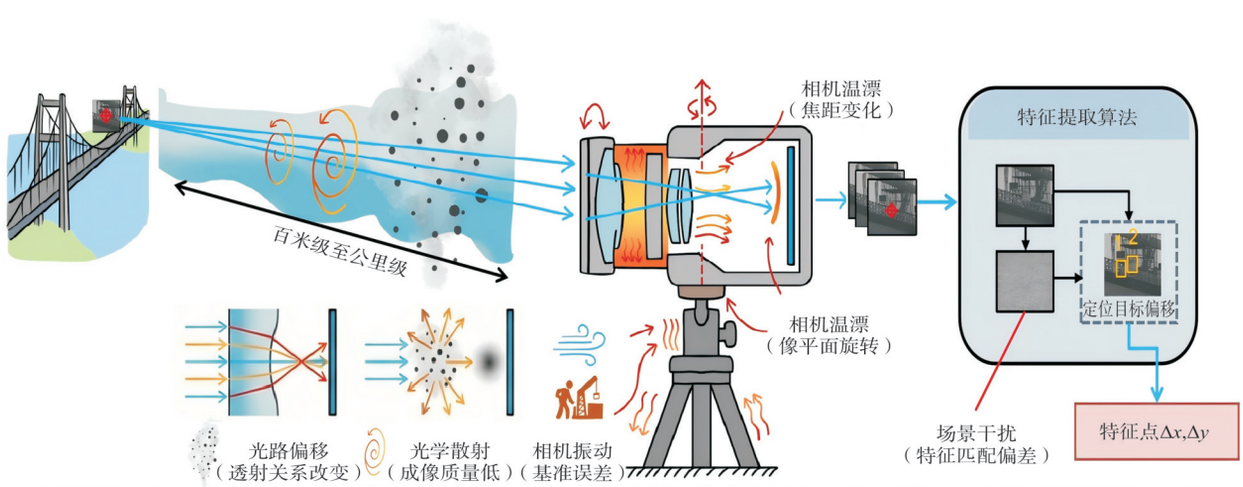


图1　视觉测量系统示意图

Fig. 1　Illustration of a Vision Measurement System

1.2 测点表征

基础设施表面测点的位移反映了其结构形变程度，准确表征测点是实现高精度形变监测的前提。测点通常分为人工标志与纹理特征两类。其中，人工标志包含编码标志、散斑、主动发光靶标和被动反射靶标。编码标志采用对比度高、几何中心明确的编码图案，配合已知尺寸确定尺度基准，可实现高精度测点定位，适用于便于安装维护的测区。散斑是在表面喷涂形成的随机灰度图案，便于通过数字图像相关(digital image correlation，DIC)获取位移场与应变场[4]。主动发光靶标采用自身光源，适用于环境照明不足的场景。被动反射靶标通常采用逆反射材料，将入射光沿来向反射，无需供电，但要求光源与相机近轴布置[8]。

在被测对象表面不便安装标志或不允许破坏时，可采用结构自身的纹理、边缘与角点作为测点进行跟踪监测。这类特征通过图像特征提取算子获得。线状构件多采用Canny等梯度算子和Hough变换提取边缘或中心线，面状区域可通过Harris算子检测角点，或采用SIFT(Scale Invariant Feature Transform)提取具有尺度与旋转不变性的特征点及描述子[3]。Mask R-CNN等实例分割网络也被用于学习测点表观特征，在复杂背景中定位构件或标志，减少人工初始化[9]。纹理特征免除了标志安装作业，并支持高密度位移测量，但其定位稳定性受表面状态与纹理变化影响。人工标志则需保持安装牢固，并与被测部位协调变形。

1.3 跨帧匹配方法

形变监测通常需要连续观测，准确的跨帧匹配是稳定测量的前提，主要包括空域方法与频域方法。空域方法通过灰度或特征的相似性确定同名位置。其中，模板匹配法在感兴趣区域搜索与模板表观最相似的位置，作为当前帧的测点位置，并通过Lucas-Kanade迭代与亚像素插值提高定位分辨能力[10]。特征匹配法通过描述子在帧间建立同名点对应，并可引入孪生网络(Siamese Network)学习相似性度量，减弱相似背景对目标跟踪的干扰[11]。针对拉索、吊杆等线状构件，通过逐帧比对拟合的构件中心线计算位移，可实现振动监测[12]。为获取结构表面的全场形变，DIC可在图像子区上估计密集位移，光流法则通过像素运动场描述表面位移分布[4,13]。然而，训练样本难以覆盖不同监测对象、气象与光照条件，数据驱动方法的跨场景泛化能力仍受限制[14]。

除空域方法外，频域方法通过局部空间相位变化估计像面位移，无需逐点搜索同名位置。相位运动放大进一步对选定时间频率范围内的相位变化进行放大，将微小振动转化为可辨像移，便于识别结构的振动特征[15]。亚像素位移也可通过灰度相关与光流方法直接估计，运动放大主要用于增强微振动的可辨识性。其适用性受局部纹理、运动幅值与放大系数影响，过度放大会增强噪声并产生伪影，定量测量还需检核放大前后的幅值关系。

1.4 形变解算

测点经跨帧匹配后可求得像面位移，进一步通过几何映射换算为物理位移。物平面垂直于光轴、深度变化可忽略且镜头畸变得到校正时，可采用长度与像素的比例直接换算。离轴平面观测需用单应矩阵描述透视映射，面外运动或三维位移则需结合立体交会、多视几何或已知形状与运动约束进行解算[3]。绝对尺度可由已知尺寸标志、独立测距或已标定的双目基线引入，控制点用于建立坐标联系与检核[2]。若全视场内的成像尺度并非常量，可布设多个控制点进行求解。几何模型包含的参数越多，对标定精度与控制条件的要求越高。

由于形变监测是长期连续过程，监测结果多为测点的位移序列，可进一步通过时序处理提高测量的准确性和鲁棒性。常用方法包括滤波抑制噪声、趋势分析以及缓变与振动分量的分离，并按统一时间基准进行重采样[3]。位移序列可用于计算挠度、隧道收敛与沉降或模态参数，位移场还可进一步用于应变分析[4]。滤波参数需根据监测目标设定，振动分析需保留相应频率范围内的幅值与相位信息，长期沉降观测则需保留缓变趋势。各环节的误差在实验室条件下可分别标定，但在工程现场会相互耦合并被放大。低照度、雨雾与弱纹理降低成像对比度，大气折射变化引起像点偏移，测站晃动与长期漂移影响跨期观测基准，单站视场有限则限制测区覆盖[4]。

2 工程应用的挑战与应对

视觉测量在实验室条件下已能达到亚毫米级精度，但在实际工程应用中，受复杂观测条件与全天候监测需求影响，仍面临诸多挑战。本章分析挑战的成因，并梳理现有的应对措施[1,3,4]。环境与测站状态变化引起误差的主要过程及相应控制措施如图2所示。

2.1 成像光场退化

相较于稳定的实验室验证，长距离、全天候的基

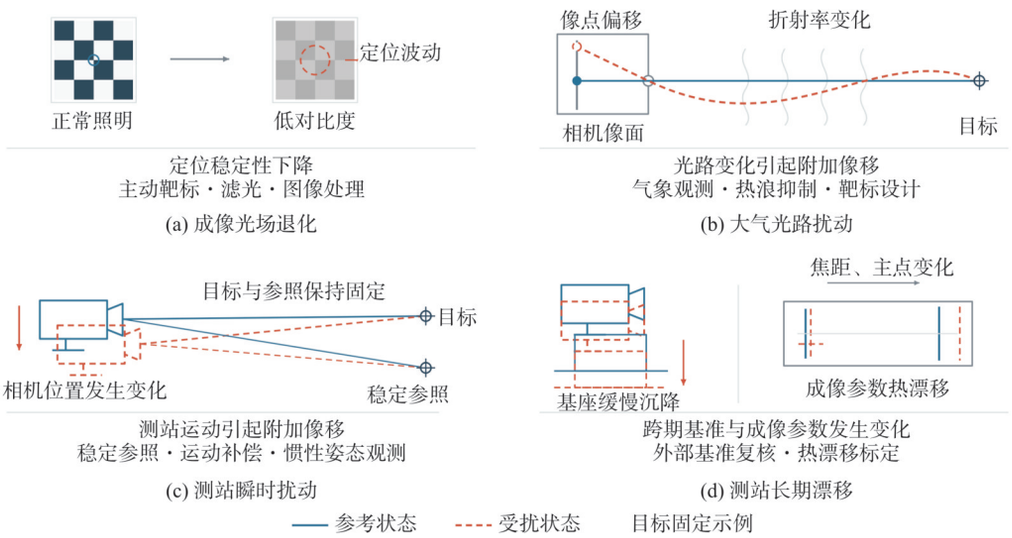


图 2　复杂工程环境下视觉测量误差的形成与控制

Fig. 2　Mechanisms and Control of Vision Measurement Errors Under Complex Engineering Conditions

础设施形变视觉监测常面临成像光场退化的挑战。外场昼夜交替会导致目标与背景亮度变化,出现向阳过曝、夜间照度不足等现象。低照度使有效光信号减弱,读出噪声的相对影响增大,逆光与强反差则使局部欠曝或饱和,影响跨帧匹配的准确性[4]。成像光场退化的直接后果是人工标志与纹理特征的成像对比度不足,测点定位精度下降,严重时相关峰展宽乃至跟踪中断。

基于上述问题,可在目标端引入可控光源,减少成像对环境照明的依赖。Tian 等[8]采用主动发光靶标配合窄带滤光片抑制背景光,实现远距离桥梁挠度观测。现场不具备主动发光靶标布设条件时,可通过算法改善既有影像的测点定位。Luo 等[16]通过边缘增强改进梯度匹配,在低对比度下提取边缘并减少虚假匹配。Chen 等[17]结合时空上下文与光流跟踪,改善光照变化下的位移测量稳定性。Huang 等[18]通过分段去噪与线特征提取应对复杂光照下的桥梁位移监测。另一方面,在成像端可采用红外观测。近红外补光利用目标反射光形成影像[19],热红外成像则记录热辐射分布,其测程受空间分辨能力与热对比度限制。事件相机在亮度变化达到阈值时输出事件,适于动态振动观测[20],对缓变目标的响应受对比度与运动速度影响。影像增强的测量效果需通过定位偏差检验,严重欠曝、饱和或完全遮挡造成的信息缺失难以通过后处理恢复。

2.2　大气光路扰动

除光场退化外,测站与目标之间的长程光路长期暴露于大气之中,全天候连续观测还须面对大气光路扰动的挑战。一方面,雨雾与粉尘使大气透过率下降,削弱目标与背景的对比度。另一方面,空气折射率随压力、温度与成分变化,湍流造成折射率随机波动并引起像点抖动,日照形成的温度梯度则产生系统性偏折[21]。跨越水面或沥青桥面的长距离观测中,单点气象记录难以完整表征沿程折射率变化[5]。光路扰动造成的像移与真实形变叠加,可能导致结构变形程度误判,日周期偏折尤其易与结构温致位移混淆。

针对上述问题,可沿光路布设气象传感器,结合空气折射率模型估计光线偏折[21]。其修正效果受沿程观测密度与模型适用性限制,传感器布设过密还会增加监测成本。当现场不具备沿程气象观测条件时,可通过图像后处理、靶标设计与观测布局抑制误差。Kong 等[22]将双树复小波用于桥梁位移测量的热浪抑制;Huang 等[23]通过多测点靶标设计降低湍流误差;Luo 等[5]还利用静止背景的误差统计及多目标信息进行综合修正。然而,时序处理需避免削弱真实振动,空间平均要求参与测点具有一致或已知的运动关系,静止背景与目标还需具有足够的光路相关性,对工程适用的光路扰动修正方法仍需进一步研究。

2.3　测站瞬时扰动

测站通常架设于形变影响范围之外的稳定区域,作为观测基准。但工程现场测站仍可能受到交通动荷载、临近施工与风荷载的影响,观测墩与支架随之发生平移和转动,这类测站瞬时扰动会产生严重的测量误差。在近轴、小角度观测条件下,相机横向平移会产生反向相对位移,微小转动引起的虚假位移随观测距离增大[3]。远距离长焦条件下,微小

角位移即可产生与准静态形变同量级的像移。若晃动频率接近结构固有频率,频域滤波难以将二者分离。

基于上述问题,测站瞬时扰动的抑制方法主要分为三类。其一是从安装端减振,采用稳固墩台、低重心支架与减振连接。其二是引入静止基准反求测站运动,并从测量结果中扣除。Yoneyama等[24]采用桥墩等未变形区域作为参考,通过透视变换估计相机运动,修正结果与位移传感器观测相符。当背景与目标存在明显深度差时,平面模型难以充分描述视差,需引入相应的位姿约束。并联相机网络通过固连的测量相机与校正相机观测稳定控制点,修正平台运动[25],串联相机网络则将稳定基准逐站传递至不稳定测区[3]。其三是惯性视觉融合,将影像测点坐标与惯性姿态观测引入隧道沉降解算,减小测量平台振动的影响[26]。减振措施只能降低扰动幅值,视觉参照法与相机组网需维持控制点稳定和几何标定。惯性姿态观测可约束相机转动,测站平移与长期漂移仍需结合稳定参照进行修正。

2.4 测站长期漂移

基础设施服役年限常达数十年,形变监测须随之长期连续进行,测站在此期间会因基座沉降或蠕变发生长期漂移。视觉测量依赖稳定参照修正漂移,但在边坡、水库等监测场景中,长期稳定的测量基准往往难以维持。温度变化还会改变相机焦距、主点与器件相对位置,引起成像参数热漂移[6]。这些误差与结构沉降、徐变等真实缓变叠加,仅凭目标的长期像移难以分离。

针对上述问题,须通过外部基准复核测站位置,并对相机内部参数进行标定。GNSS、静力水准与测量机器人可提供测站位置或高程的独立观测,In-SAR可提供区域沉降背景[1]。针对相机热漂移,Xing等[6]通过双视场成像补偿相机运动与热效应;Zhang等[27]通过测量与标定共视成像开展在线校正。结构自身的温致变形属于真实响应,分析荷载效应与残余趋势时,可通过局部异常修正与卷积平滑提取温致响应[28]。外部基准复核的时间间隔影响漂移约束的连续性,温致响应分离则需要足够的历史观测支撑。

2.5 测区覆盖不足

基础设施多为长大结构,长距离隧道、多联长桥与连续坡面要求沿线覆盖,测区覆盖不足成为视觉监测的常见困难。一方面,在传感器分辨率与测距给定时,单站扩大视场会降低物方空间分辨能力,测点定位精度随之下降。另一方面,隧道曲线段与结构遮挡使部分区间不通视,即便在通视区段,离散测点也难以完整描述断面形态。

针对上述问题,其一是将多台相机组成统一基准的网络。Yu等[29]采用位移接力与串联网络,将测量延伸至不通视区段。并联网络通过冗余观测补偿测站运动[25],非重叠视场系统则可借助固连约束或合作标志估计相对位姿[30]。隧道监控量测中,网形设计、公共点精度及测量机器人的控制观测共同影响组网联测成果[1]。其二是从点位测量扩展至断面测量。连捷等[31]通过红外线结构光在隧道断面投射检测线,由双目测站采集光条影像并重建密集点云,计算拱顶沉降与周边收敛。组网误差沿观测链传递,可通过闭合条件、冗余观测与整体平差加以抑制,链末仍需独立基准检核[32]。断面测量依赖被测面的漫反射成像,施工作业遮挡会使光条断裂[31]。

3 典型工程应用

3.1 桥梁工程监测

大跨桥梁需连续获取主梁挠度与线形、拉索振动,并进一步识别索力与模态参数。接触式位移计的参考端布设受桥下空间限制,全站仪逐点轮测则难以同步获取多测点动态响应。视觉测量可通过远距离成像同步获取梁体位移与索振,减少接触式传感器的安装与布线。Yin等[33]将相机组网用于大跨桥梁多点挠度监测,通过多测站观测扩大覆盖范围。Du等[12]采用形态识别与特征匹配提取主梁位移和拉索振动,支持多类构件的同步观测。桥梁监测配置需兼顾观测距离、响应频率与参照稳定性,动态测量侧重采样与运动补偿,长期挠度观测则侧重基准维持与漂移修正。

3.2 隧道工程监测

隧道需观测收敛、拱顶沉降与管片位移。传统全站仪、水准仪与收敛计观测受作业面、低照度和沿线通视条件限制,视觉系统可通过主动照明实现多点自动采集[1]。惯性视觉测量可用于隧道实时沉降监测,现场结果与全站仪观测相符[26]。Chen等[19]进一步结合惯性视觉测量与LLaMA,开展隧道形变观测和监测数据分析。Yao等[30]研究了非重叠视场相机的盾构隧道收敛测量;Yin等[34]将串联网络用于沉管管节浮运安装期的挠度监测。连捷等[31]通过线结构光获得隧道断面轮廓,累计沉降与收敛量的现场比测差值达到亚毫米量级。隧道监测配置主要取决于断面形态、通视条件与基准布设,主动照明与组网

支持沿线观测,沉降解算还需稳定的基准点。

3.3　边坡工程监测

边坡表面位移与路基沉降兼具长期缓变和失稳前加速的特征。传统测斜管、位移计与定期全站仪观测受测点布设和观测周期限制,视觉测量可提高通视坡面的测点密度与采样连续性。Hu 等[35]通过双目系统参数优化与图像处理改善坡面位移测量,在试验条件下获得毫米量级结果。Chen 等[36]采用结构光重建边坡物理模型的形态变化,为变形识别提供了试验方法。区域 InSAR 观测可提供沉降背景,局部视觉观测则补充重点部位的连续位移信息[1]。边坡监测配置主要取决于稳定基准与可见坡面的分布,双目基线和测距影响三维解算精度,植被遮挡与表面变化则限制长期连续跟踪。

3.4　大坝工程监测

大坝需长期获取坝顶位移、坝面变形与坝体挠曲,并结合温度、水位和时效因素分析结构响应。垂线、引张线、静力水准与 GNSS 等方法可提供连续点位观测,但测点分布受安装条件限制。视觉测量通过远距离成像获取坝面可见部位的多点位移,可补充既有监测系统的空间覆盖[3,37]。相机运动与热漂移补偿为长期观测提供了方法基础[6,27],具体应用仍需通过独立仪器比测检验跨期稳定性。位移序列的分析应结合水位与温度变化建立解释模型,识别可逆响应之外的持续变形[37]。大坝监测配置主要取决于缓变观测所需的基准与参数稳定性,光路布设、相机热稳定性和基准复核是长期连续测量的重点。

4　发展展望

基础设施形变视觉监测的持续发展,需要将算法改进与外场适应性、长期稳定性及工程应用需求结合。

1)发展物理约束下的数据驱动方法,提高扰动补偿与监测数据分析能力。多维环境特征融合已被用于视觉测量扰动补偿[38],Chen 等[19]则将 LLaMA 用于隧道监测数据分析与评估报告生成。后续可结合成像几何与结构动力先验,研究影像、环境观测和设备状态的联合建模,改善跨场景应用的稳定性[14]。深度光流与概率模型可用于分析位移估计的不确定性[39],但其输出区间需经过独立参考观测校准,并与几何标定、测站运动等误差分量共同评定[2]。依据测量不确定度表示指南开展误差传播分析,并结合工程限值制定超限判定规则,可为监测结果评价提供计量依据[40]。

2)建立公开的外场形变监测基准数据集,支撑跨结构、跨季节的性能比较。数据集应包含原始影像、同步参考观测、环境与设备参数、异常及缺测样本,并说明参考仪器的不确定度[2,4]。训练集与测试集按结构、测站和时间段划分,避免相邻视频帧重复进入不同数据子集而高估泛化性能。评价指标除定位偏差与长期漂移外,还应包含动态幅值、相位与频率偏差,以及失锁率和有效观测率。通过统一观测条件与评价方法,比较不同测距、焦距和测点形式下的性能差异,为系统选型与模型迁移提供依据。

3)建立视觉与多源观测协同的监测体系,提高形变解算与基准维持能力。Wu 等[41]利用加速度重建位移与视觉位移的同频关系估计斜视尺度因子。相机网络引入独立位置、倾角与测距观测则有助于约束基准和误差传递[29,32]。多源融合需统一观测方向、时间基准与坐标框架,处理多采样率数据及其相关误差[42]。局部视觉观测与区域遥感信息在统一时空基准下建立联系,可为基础设施状态分析与时空智能应用提供连续观测数据[1,43]。

4)发展多传感器一体化测量装备,提高系统部署与连续运行的稳定性。相机、惯性器件、测距单元和授时模块的集成,可在统一标定与同步条件下完成影像采集、姿态观测和位移解算[3,26]。北斗惯性视觉测量仪的外观如图 3 所示。车载与轨道式移动测站可扩大长大结构的巡测范围,其关键是分离测站运动与结构形变[44-45],并将位姿估计的不确定度传递至测量结果[2]。事件相机与灰度相机的联合观测可补充快速振动信息,需进一步建立联合标定及事件触发误差模型[20]。装备研制还应考虑重新安装、断电恢复和跨期重定位后的基准复核,使标定参数与观测条件保持可追溯。



(a) 正面外观　　(b) 背面外观

图 3　北斗惯性视觉测量仪外观示意图

Fig. 3　Illustration of a BeiDou-Inertial-Vision Measuring Instrument

5　结束语

随着成像装备与测量方法的发展,视觉测量逐步适应基础设施静动态形变观测的不同需求。然而,工程现场的环境变化与测站不稳定往往同时作

用于观测过程,使实验条件下的测量精度难以在长期监测中持续保持。因此,提高工程应用的稳定性还需将图像处理、误差修正与基准维持结合起来,并通过外场数据和独立参考观测检验其效果。在此基础上,物理模型与数据驱动方法的融合有望增强环境适应性,多源协同则有助于完善形变解算与基准约束。随着一体化装备及其联合标定方法的完善,视觉测量有望实现更加稳定的连续观测,为基础设施安全评估与养护决策提供可靠依据。

参考文献

[1] 许俊伟,刘永胜,吴达,等. 隧道与地下工程监控量测技术的发展与展望[J]. 测绘地理信息,2023,48(3):7-13

[2] Neyestani A, Picariello F, Tudosa I, et al. Vision-Based Displacement Measurement for Structural Health Monitoring: A Metrology-Oriented Review of Uncertainty Quantification[J]. Buildings, 2026, 16(13): 2659

[3] 于起峰,张强,陈文均,等. 大型工程结构静动态变形摄像测量方法与应用[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(1):0112001

[4] Zhuang Yizhou, Chen Weimin, Jin Tao, et al. A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments[J]. Sensors, 2022, 22(10): 3789

[5] Luo Longxi, Feng M Q, Wu Jianping. A Comprehensive Alleviation Technique for Optical-Turbulence-Induced Errors in Vision-Based Displacement Measurement[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(3): e2496

[6] Xing Lei, Dai Wujiao, Zhang Yunsheng. Improving Displacement Measurement Accuracy by Compensating for Camera Motion and Thermal Effect on Camera Sensor[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108525

[7] Guo Wei, Li Jiacheng, Hu Yao. Vision-Based Displacement Measurement Method of Large-Scale Bridges Using Tilt Shift Camera and Fast Spatio-Temporal Context Learning[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 112165

[8] Tian Long, Pan Bing. Remote Bridge Deflection Measurement Using an Advanced Video Deflectometer and Actively Illuminated LED Targets[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1344

[9] Zhang Yang, Liu Peng, Zhao Xuefeng. Structural Displacement Monitoring Based on Mask Regions with Convolutional Neural Network[J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 120923

[10] Guo Jie, Zhu Chang'an. Dynamic Displacement Measurement of Large-Scale Structures Based on the Lucas-Kanade Template Tracking Algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 66/67: 425-436

[11] Xu Yan, Zhang Jian, Brownjohn J. An Accurate and Distraction-Free Vision-Based Structural Displacement Measurement Method Integrating Siamese Network Based Tracker and Correlation-Based Template Matching[J]. Measurement, 2021, 179: 109506

[12] Du Wenkang, Wang Hao, Lei Dong, et al. Cable Vibration and Girder Displacement Measurement via Morphology Recognition and Feature Matching Methods in Bridge Structure[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 11131

[13] Dong Chuanzhi, Celik O, Catbas F N, et al. Structural Displacement Monitoring Using Deep Learning-Based Full Field Optical Flow Methods[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(1): 51-71

[14] Duan Shundi, Tan Xiao, Guo Pengwei, et al. The Transformative Roles of Generative Artificial Intelligence in Vision Techniques for Structural Health Monitoring: A State-of-the-Art Review[J]. Advanced Engineering Informatics, 2025, 68: 103719

[15] Luo Kui, Kong Xuan, Li Jinzhao, et al. Motion Magnification for Video-Based Vibration Measurement of Civil Structures: A Review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 220: 111681

[16] Luo Longxi, Feng M Q. Edge-Enhanced Matching for Gradient-Based Computer Vision Displacement Measurement[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 33(12): 1 019-1 040

[17] Chen Sihao, Luo Yongpeng, Liao Feiyu. Computer Vision-Based Displacement Measurement Using Spatio-Temporal Context and Optical Flow Considering Illumination Variation[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2024, 14(8): 1 765-1 783

[18] Huang Zuoyue, Chu Xi, Li Jiantong, et al. Visual-Guided Bridge Displacement Monitoring with Segmented Denoising and Linear Feature Extraction in Complex Light Field[J]. Measurement, 2026, 264: 120247

[19] Chen Fubin, Chen Boyu, Zhang Chenchen, et al. Subway Tunnel Deformation and Health Monitoring with Visual-Inertial Measurement and LLaMA[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2026, 40(5): 04026076

[20] Lv Yuanyuan, Zhou Liang, Liu Zhaohui, et al. Structural Vibration Frequency Monitoring Based on Event Camera[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(8): 085007

[21] Owens J C. Optical Refractive Index of Air: Dependence on Pressure, Temperature and Composition[J]. Applied Optics, 1967, 6(1): 51

[22] Kong Xintong, Wang Baoquan, Feng Dongming, et al. A Novel Method for Heat Haze-Induced Error Miti-

gation in Vision-Based Bridge Displacement Measurement[J]. Sensors, 2024, 24(16): 5151

[23] Huang Xingyu, Dai Wujiao, Zhang Yunsheng, et al. A Mitigation Method for Optical-Turbulence-Induced Errors and Optimal Target Design in Vision-Based Displacement Measurement[J]. Sensors, 2023, 23(4): 1884

[24] Yoneyama S, Ueda H. Bridge Deflection Measurement Using Digital Image Correlation with Camera Movement Correction [J]. Materials Transactions, 2012, 53(2): 285-290

[25] Liu Xiaolin, Hu Biao, Yin Yihe, et al. Parallel Camera Network: Motion-Compensation Vision Measurement Method and System for Structural Displacement [J]. Automation in Construction, 2024, 165: 105559

[26] 华远盛, 陈博宇, 刘欣琳, 等. 地铁隧道沉降惯性视觉实时监测法[J]. 测绘学报, 2025, 54(12): 2 182-2 193

[27] Zhang Qiang, Yu Qifeng, Hu Biao, et al. An Online Thermal Drift Calibration Method for Vision-Based Displacement Measurement Using Measurement-Calibration Co-viewing Imaging[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2026, 201: 109712

[28] Zhang Wei, Yang Hongyin, Cao Hongyou, et al. Separation of Temperature-Induced Response for Bridge Long-Term Monitoring Data Using Local Outlier Correction and Savitzky-Golay Convolution Smoothing [J]. Sensors, 2023, 23(5): 2632

[29] Yu Qifeng, Guan Banglei, Shang Yang, et al. Flexible Camera Series Network for Deformation Measurement of Large Scale Structures [J]. Smart Structures and Systems, 2019, 24(5): 587-595

[30] Yao Chenxi, He Shuaimin, Chen Hao, et al. Pose Estimation of Nonoverlapping FOV Cameras for Shield Tunnel Convergence Measurement[J]. Measurement, 2025, 242: 116101

[31] 连捷, 田四明, 石峥映, 等. 基于机器视觉线结构光的隧道围岩变形自动化监测技术[J]. 中国铁路, 2026(6): 25-35

[32] 张跃强, 陈铭杰, 胡彪, 等. 基于相机组网的测量误差传递机理及抑制方法[J]. 光学学报, 2023, 43(21): 2112002

[33] Yin Yihe, Yu Qifeng, Hu Biao, et al. A Vision Monitoring System for Multipoint Deflection of Large-Span Bridge Based on Camera Networking[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2023, 38(13): 1 879-1 891

[34] Yin Yihe, Yu Qifeng, Zhang Yueqiang, et al. Deflection Monitoring of Immersed Tunnel Element during Floating Transportation and Installation Based on Series Camera Network[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 172: 107857

[35] Hu Qijun, Feng Ziyuan, He Leping, et al. Accuracy Improvement of Binocular Vision Measurement System for Slope Deformation Monitoring[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1994

[36] Chen Zhijian, Zhang Changxing, Tang Zhiyi, et al. Three-Dimensional Reconstruction and Deformation Identification of Slope Models Based on Structured Light Method[J]. Sensors, 2024, 24(3): 794

[37] Wang Shaowei, Gu Chongshi, Liu Yi, et al. Displacement Observation Data-Based Structural Health Monitoring of Concrete Dams: a State-of-Art Review[J]. Structures, 2024, 68: 107072

[38] 陈博宇, 刘欣琳, 朱松, 等. 融合多维环境特征的视觉测量扰动补偿[J]. 测绘通报, 2026(3): 106-111

[39] Wen Haifeng, Dong Ruikun, Dong Peize. Structural Displacement Measurement Using Deep Optical Flow and Uncertainty Analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 181: 108364

[40] JCGM. Evaluation of Measurement Data—Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: JCGM 100:2008[S]. Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008, doi: 10.59161/jcgm100-2008e

[41] Wu Tong, Tang Liang, Zhang Xiangyu, et al. An Improved Structural Displacement Monitoring Approach by Acceleration-Aided Tilt Camera Measurement[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2023(1): 6247516

[42] Wu Tong, Tang Liang, Lang Lin, et al. Data Fusion Techniques for Structural Displacement Monitoring: From Concept to Application a Review[J]. Measurement, 2026, 273: 121153

[43] 李德仁, 王密, 肖晶, 等. 论无所不在的时空智能[J]. 遥感学报, 2025, 29(6): 1 388-1 398

[44] Lee J, Lee K C, Jeong S, et al. Long-Term Displacement Measurement of Full-Scale Bridges Using Camera Ego-Motion Compensation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 140: 106651

[45] Yu Qifeng, Yin Yihe, Zhang Yueqiang, et al. Displacement Measurement of Large Structures Using Nonoverlapping Field of View Multi-camera Systems Under Six Degrees of Freedom Ego-Motion[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2023, 38(11): 1 483-1 503

修回日期:2026-09-09

第一作者:朱松,博士,高级工程师,主要从事动态精密工程测量与基础设施安全监测。 E-mail:zhusong2021@email.szu.edu.cn

通信作者:华远盛,博士,副研究员,主要从事动态精密工程测量与基础设施安全运维。 E-mail: yuansheng.hua@szu.edu.cn