

TB

团 体 标 准

T/CSGPC XXX-2025

大型结构体表面形变 惯性视觉监测技术要求

Technical specification for inertial vision-based
deformation monitoring of large-scale infrastructure

(初稿)

(本稿完成时间: 2025 年 8 月 18 日)

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

中国测绘学会 发布

目 次

前言 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语、定义和缩略语 1

4 基本规定 2

5 监测系统 3

6 监测实施 5

7 数据处理 6

8 监测成果 7

附录 A（资料性） 监测点位移计算..... 8

附录 B（资料性） 某大型结构体表面形变监测记录表..... 9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国测绘学会提出并归口。

本文件起草单位：深圳大学、深圳市智源空间创新科技有限公司、中国科学技术大学、新疆塔里木河流域管理局、水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院、中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所、西南交通大学、中铁六局集团有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司、重庆市测绘科学技术研究院、新疆维吾尔自治区塔里木河流域下坂地水利枢纽管理中心、南方电网储能股份有限公司、深圳市城市公共安全技术研究院有限公司、广州市城市规划勘测设计研究院有限公司、深圳市水务规划设计院股份有限公司、深圳市交通工程试验检测中心有限公司、深圳市建设综合勘察设计院有限公司、深圳市地质环境研究院有限公司、深圳市深水水务咨询有限公司。

本文件主要起草人：李清泉、华远盛、朱家松、李江、朱松、元鹏鹏、罗涛、邓昌、闫宏业、陈福斌、贾广武、王国祥、胡波、张明、张宜、秦敢、刘洋、林杰、舒志勇、宋军、马君伟、朱东阳、孟凡一、周涛、朱东辉、温嘉琦、李竹庆、吴可嘉、刘畅、陈良超、库尔班·吾斯曼、朱宏、葛翔、张郁、王煌、田超、王波、郑莉、肖智文、吴丹、张啸、蔡勇、陈博宇、王龙、王璐瑶。

引 言

改革开放以来，我国持续推进基础设施建设。然而，随着基础设施服役年限增长，性能退化、长期荷载、自然灾害等因素导致的事故灾害正逐渐增多，严重影响社会安全与稳定。因此，针对《工程测量标准》GB 50026-2020中第10.1.1中指出的工业与民用建（构）筑物、建筑场地、地基基础、水工建筑物、地下工程建（构）筑物、桥梁、滑坡等开展变形监测，及时预警潜在事故灾害，对提高基础设施运维水平，保障其安全服役具有重大意义，是工程测量的重要内容之一。

现有全站仪、水准仪、卫星定位、监测机器人等监测手段存在测量频次低、人工依赖强、监测成本高等问题，并且易受天气环境和设备自身晃动影响，无法实现高频、准确、实时、全天候的工程建（构）筑物变形监测。视觉变形监测作为一种新型监测技术，通过在工程建（构）筑物表面测点安装反光靶标，利用图像传感器与光学镜头对靶标进行高频成像，融合惯性测量单元实时记录图像传感器姿态数据，结合测站与测点空间物方关系，最终实现变形监测，有效解决现有监测方法在复杂环境下测量精度不足的问题。

尽管视觉变形监测技术已在地铁隧道沉降监测、大坝表面变形监测、桥梁挠度监测、建筑群沉降监测等领域开展应用并取得显著成效，现有技术标准和规范均未对其技术应用和业务实施等方面明确规范。因此，亟需制定《视觉变形监测技术规范》行业标准，通过技术标准文件规范化技术应用，使相关过程环节和操作步骤有章可循、有据可考，从而构成以技术标准为主干的技术应用框架体系。此外，该行业标准的制定将为新型视觉变形监测技术在交通、水利、市政等基础设施安全监测领域的应用落地和普及推广提供规范保障，促进打造基础设施安全运维新范式，全面推动其数字化和智能化转型升级的同时极大降低运维成本。

大型结构体表面形变惯性视觉监测技术要求

1 范围

本文件规定了采用惯性视觉监测技术进行大型结构体表面形变监测的监测对象、系统组成、设备校验、系统实施以及运维管理的要求。

本文件适用于惯性视觉监测技术在工业与民用建（构）筑物、建筑场地、地基基础、水工建筑物、地下工程建（构）筑物、桥梁、滑坡等大型结构体表面形变监测中水平和垂直位移监测相关的技术领域和业务领域的应用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 50026-2020 工程测量标准
GB 55018-2021 工程测量通用规范
GB 50167-2014 工程摄影测量规范
GB/T 12979 近景摄影测量规范
GB/T 50308-2017 城市轨道交通工程测量规范
GB/T 50729-2011 铁路工程测量规范
SL 578-2018 水利水电工程测量规范
JGJ 8-2016 建筑变形测量规范
CH/T 1028-2012 变形测量成果质量检验技术规程
CH/T 6007-2018 城市轨道交通结构形变监测技术规范
JT/T 1498-2024 公路工程施工安全监测与预警系统技术要求
DZ/T 0283-2015 地面沉降调查与监测规范

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

惯性视觉变形监测技术 Inertial Vision-based Deformation Monitoring Technology

融合惯性测量与计算机视觉技术的新型变形监测方法，通过在待测目标表面安装反光靶标，利用图像传感器与光学镜头对靶标进行高频成像，实时感知标靶的运动状态和视觉特征变化，实现对目标结构变形过程的高精度动态监测。

3.1.2

测量相机 Measurement Camera

用于获取监测目标图像信息，并通过图像处理和相关计算来确定目标变形情况的相机设备。与测量靶标进行组合使用，在监测期间输出目标测点的实时变形量，主要部件包括图像传感器、惯性测量单元、镜头、补光灯、数据处理单元、光学滤镜、电源模块、通讯模块和相机壳体等。

3.1.3

机器视觉 Machine Vision

采用计算机图像处理技术，通过物体的实时图像处理实现对物体的检测、识别、定位和测量，主要步骤包括图像获取、图像预处理、特征提取、模式识别和决策输出。

3.1.4

惯性测量单元 Inertial Measurement Unit

由陀螺仪、加速度计和磁力计组成的集成传感器模块，通过测量相机在三维空间中的加速度、角速度及磁场强度，基于惯性导航原理计算测量相机的实时位置和姿态。

3.1.5

姿态纠正 Pose Correction

通过惯性测量单元对测量相机在三维空间中的姿态进行实时测量，为数据处理单元提供姿态数据以消除由相机运动导致的测量偏差。

3.1.6

六自由度运动 Six Degrees of Freedom Motion

测量相机在三维空间中沿三个正交轴进行平移运动，同时绕这三个轴进行旋转运动（俯仰、横滚、偏转），共6个独立的运动方向，可完整描述测量相机的空间位置和姿态。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

IMU	Inertial Measurement Unit	惯性测量单元
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球导航卫星系统

4 基本规定

4.1 一般规定

4.1.1 监测作业前，应根据项目委托方要求、结构体类型、结构体规模、地质条件、施工计划以及测区条件等编写变形监测方案设计。方案设计应包括监测的目的、技术依据、精度等级、监测方法、监测网精度估算和点位分布、观测周期、项目预警值、使用的仪器设备、系统平台、数据处理方法、信息反馈和成果质量检验等内容。

4.1.2 方案设计应体现可靠性、经济性和可检验性。

4.1.3 变形监测网应由基准点、测站点和监测点构成。监测周期应根据结构体的变形特征、变形速率、观测精度和地质条件等综合确定。监测期间应根据变形量的变化情况调整。

4.1.4 基准点、测站点和监测点的布设应在符合 GB 55018-2021 规定下，符合本要求第六章的规定。基准点应布设在监测对象变形影响范围以外，且位置稳定的地方。监测点应布设在结构体重要节点、荷载突变部位、变形敏感部位等。测站点布设宜参考基准点规定，且能通视基准点、监测点。各点位应便于观测、不易破坏，标志应稳固，且不得影响结构体功能。

4.1.5 监测频率应以能反映被监测的结构体变形特征，并满足分析评价要求为准则来确定。

4.1.6 结构体变形控制值应由设计方给定，无设计方时，应根据结构体情况参考相关资料与委托方协商确定。

4.1.7 监测数据应定期备份。

4.1.8 监测系统应定期进行检查和维护，宜定期进行人工比测。

4.1.9 结构体变形监测可采用独立的平面坐标系统及高程基准。

4.1.10 结构体变形监测应采用公历纪元、北京时间作为统一时间基准。

4.2 精度要求

4.2.1 结构体变形监测应以中误差作为衡量精度的指标，并以二倍中误差作为极限误差。

4.2.2 结构体变形监测平面位移和竖向位移采用同等精度，其等级划分及精度要求应符合表 4.2.2 的规定。

表4.2.2 结构体变形监测的等级划分及精度要求（mm）

等级	监测点中误差	适用范围
一级	0.5	变形特别敏感的高层建筑、高耸构筑物、工业建筑、重要古建筑、大型坝体、精密工程设施、特大型桥梁、大型直立岩体、大型坝区地壳变形监测等
二级	1.0	变形比较敏感的高层建筑、高耸构筑物、工业建筑、古建筑、特大型和大型桥梁、大中型坝体、直立岩体、高边坡、重要工程设施、重大地下工程、危害性较大的滑坡监测等
三级	2.0	一般性的高层建筑、多层建筑、工业建筑、高耸构筑物、直立岩体、高边坡、深基坑、一般地下工程、危害性一般的滑坡监测、大型桥梁等
四级	4.0	观测精度要求较低的建（构）筑物、普通滑坡监测、中小型桥梁等

5 监测系统

5.1 人工标志

5.1.1 人工标志是一种在监测过程中用于标识测点的标志物，通过在待测结构体上粘贴或安装标志物以提供精确的参考点，使测量相机能够精确捕捉测点位置坐标。人工标志根据应用需求可分为主动发光标志和被动发光标志。

5.1.2 主动发光标志配备红外灯珠，其波长宜选用 835nm~865nm，具备雨雾穿透能力，采用外部电源供电，可应用于 200m~500m 的长距离监测任务；

5.1.3 被动发光标志宜设计为反光棱镜或反光贴纸，可由测量相机配备的红外补光灯提供外部光源，无需额外供电，可应用于 200m 内的短距离监测任务。

5.2 测量相机

测量相机是惯性视觉变形监测技术的主要监测设备，在监测期间输出监测点的实时变形量，主要部件有图像传感器、IMU、镜头、补光灯、数据处理单元、光学滤镜、电源模块、通讯模块和相机壳体。

- a) 图像传感器的主要功能是捕捉光线并将其转换为数字图像信号，并将数字图像信号发送到数据处理单元，供后续处理和分析使用，为保证测量精度，宜选用不低于1200万像素的CMOS传感器；
- b) IMU的主要功能是测量相机在三维空间中的姿态和位移，以便对相机运动进行补偿，消除相机振动导致的测量误差，宜选用采样频率高于100Hz、绝对姿态精度优于0.01° 的高精度IMU，同时IMU采集数据与CMOS曝光时间需精准同步，同步时间应≤16ms；

- c) 镜头是光学系统中的关键组件，主要用于成像设备捕捉清晰的人工标志图像。长距离结构体变形监测任务，镜头焦距宜 $\geq 75\text{mm}$ 。短距离监测任务宜选用焦距 $\leq 36\text{mm}$ 镜头。
- d) 补光灯可内置于测量相机，光束与相机视场一致，主要功能是为被动人工标志提供外部光源，提高标志物在相机图像传感器的可视性；
- e) 数据处理单元的主要功能是实现相机端的高速图像解算，可实时进行图像提点、坐标提取、解算测量结果，宜选用低能耗、具备硬件算法加速、深度学习单元的处理芯片；
- f) 光学滤镜的主要功能是改善图像质量、减少不必要光线的干扰，宜采用带宽为 20nm 的滤镜，消除其他波段光的干扰；
- g) 电源模块的主要功能是为相机及其各组件提供电力的部分，确保相机稳定运行并执行各种功能；
- h) 通讯模块负责将相机获取的监测数据传输到外部设备平台，同时也接收外部设备发送的控制命令，实现相机的远程控制和配置；
- i) 相机壳体用于保护相机内部各部件，需与相机光学系统固结，宜具备坚固耐用、防水防尘、抗温差变化的性能。

5.3 供电系统

5.3.1 相机供电系统为测量相机及其组件提供电力的整体系统，确保测量相机在各种使用环境下稳定运行，其主要包括电源适配器、电池、充电器和电源管理电路。

5.3.2 测量相机安装区域无市电供电时，宜采用发电供电模式，优先选用锂电池和太阳能板对测量相机进行太阳能供电。为保证测量相机在光照不足条件下进行连续监测，锂电池容量宜大于 200Ah ，同时太阳能板输出功率宜大于 70W 。

5.4 数据处理平台

数据处理平台是用于解算、分析、存储和可视化测量相机监测数据的综合系统，通过数据处理平台运维人员可以实时获取监测目标的变形情况，同时平台宜具备预警功能，对监测目标的异常变形进行及时警报。

5.5 设备校验

5.5.1 监测设备在安装运行前需要进行校验工作，通过测量和验证设备的性能参数以确保测量结果的准确性和可靠性。设备校验工作主要包括设备光学系统标定和设备定姿系统标定。

5.5.2 设备光学系统标定过程宜选择标定图案并在不同位置和角度拍摄图像，使用标定软件分析图像中的特征点，计算并验证相机的内外参数，以消除图像中的光学畸变并确保图像的准确性和质量。

5.5.3 设备定姿系统标定过程宜选用移动台采集测量相机在不同姿态下的IMU数据，进行滤波和去噪处理，估计系统误差参数，调整校正模型并验证标定结果，以确保定姿系统的精度和可靠性。

5.5.4 变形监测宜采用中误差作为精度衡量指标，经校验后测量相机在 100m 的监测距离误差宜不大于 1mm

5.5.5 以安装的设备应定期校验，保障监测结果质量。

6 监测实施

6.1 测点布设

6.1.1 监测点布设应在满足相关监测规范标准、监测项目委托方、监测对象风险点分析的基础上，综合考虑人工标志类型和现场通视条件。主动发光标志宜临近供电设施，可减少走线施工成本与风险。

6.1.2 基准点位选取应在满足本标准 4.1.4 要求基础上，综合考虑测量相机通视条件。

6.1.3 监测点与基准点由人工标志及相关安装辅材构成。监测对象不具备市电供电、批量走线等条件或监测距离 ≤ 200 米，宜选择被动发光人工标志。监测对象具备供电条件且监测距离 ≥ 500 米，宜选择主动发光人工标志。

6.2 测站点布设

6.2.1 变形监测站应布设在监测区域外稳定位置，根据测点分布与测量相机的视场角选择符合下列条件的测站位置：

- a) 应使测点成像明显，轮廓清晰，且不应遮挡；
- b) 测量相机光轴宜呈水平，且垂直于测点位移方向；
- c) 单台测量相机宜通视全部测点，如无法满足观测条件，应优先选择在单个测站上架设不同朝向的测量相机，使覆盖全部测点；
- d) 单个测站无法覆盖所有测点时，应布设多个测站与多台测量相机，使覆盖全部测点；
- e) 应保证各测量相机视场内均有基准点，或不同测量相机可视范围内有同名测点；
- f) 应在布设期间利用全站仪测量各相机和其相应观测点间物方关系。

6.2.2 测站由测量相机及相关安装辅材构成。监测对象具备市电条件应优先采用市电，其它情况宜采用太阳能供电。

6.3 设备安装

6.3.1 人工标志安装方式应根据监测对象表面稳定性选择。针对人工设施表面结构稳定的，宜使用膨胀螺丝、云石胶直接固定于监测对象表面。针对设施表面为自然物、非刚体等松动的，应破坏表面并在内部坚硬处架设立柱，并在立柱上安装人工标志。内外部均不稳定时，应浇筑基座，并在基座上架设立柱与人工标志。标志安装完毕后，应调整标志发光或反光部位角度，使测量相机成像清晰。

6.3.2 测量相机安装方式应根据测站选点处表面稳定性选择。表面结构稳定，宜直接固定。表面结构松动，应破坏表面并在内部坚硬处架设立柱，并在立柱上安装测量相机。内外部均不稳定时，应浇筑基座，并在基座上架设立柱与测量相机。

6.3.3 测量相机供电系统选择见本标准第 6.3.2 款，电源线排布应固定于测站，接口处应做防水处理。采用发电供电应保障电源防水防潮。

6.3.4 测量相机安装在地下或山里工程建（构）筑物时，应采用光纤信号传输或建立局域网的方式进行测量相机与数据处理平台间通信。

6.3.5 测量相机应具备不低于 IP66 的防护等级，在气候条件、监测环境等恶劣的区域安装时宜加装外保护罩。保护罩与相机间应避免直接接触，且不能遮挡相机视场。

6.3.6 基准点、监测点与测站点应设置提示标志，且应定期人员巡检，并及时上报设备健康情况。

7 数据处理

7.1 数据预处理

7.1.1 数据格式

7.1.1.1 在存储设备和读写速度允许的情况下，测量相机所采集图像数据以 BMP 等原始数据格式存储，为保证监测数据实时性，其帧率宜大于 1HZ，同时标注图像的时间戳。

7.1.1.2 IMU 数据采集的位姿数据以 csv 或 txt 格式进行输出，其帧率宜大于 60HZ，IMU 数据时间戳需与图像数据进行同步。

7.1.2 图像数据

对图像进行预处理能去除不需要的信息或噪声，提高图像质量以便提取目标特征点。预处理过程主要包括图像灰度化、采用高斯滤波等方法对图像进行去噪、使用图像增强技术提高标志的辨识度，从而增强标志的提取精度。

7.1.3 IMU 数据

对IMU数据进行预处理能获取更精确的相机位姿变化。预处理过程宜采用低通滤波去除高频噪声，同时运用卡尔曼滤波得到准确的系统状态估计，并对陀螺仪和加速度计的数据进行零偏校正。

7.2 人工标志提取

7.2.1 按照 GB/T 12979 中的规定，标志宜具有高对比度和明确的几何形状，支持计算机自动处理提取。主/被动发光标志在图像中呈现为椭圆形光斑，可使用视觉算法对光斑中心坐标进行提取。

7.2.2 人工标志的提取一般包括平滑降噪、边缘提取和圆心坐标提取等步骤，标志点中心坐标的提取精度宜优于 1/20 像素。

7.2.3 在图像中设置 ROI 区域，ROI 区域宜包含全部标志点，在保证提取精度的同时减少计算量，从而提高数据处理速度。

7.3 相机姿态纠正

7.3.1 通过设备定姿系统标定获取 IMU 坐标系到测量相机坐标系的旋转矩阵，由旋转矩阵将 IMU 位姿数据转换为相机位姿数据。

7.3.2 测量相机监测期间受振动和其他环境因素影响而产生的位姿变化可由 IMU 实时获取，应根据应用场景构建相机姿态修正模型，在模型中使用相机位姿数据对相机运动进行补偿，从而消除由相机运动产生的测量误差。

7.4 监测点变形计算

7.4.1 结构变形是一个动态过程，应采集多个时间点的监测点中心坐标数据，以监测初始时刻的监测点中心坐标作为基准，用后续时刻的坐标数据与基准进行差值计算，从而获得监测点坐标的实时变化数据。

7.4.2 监测点的变形在图像中反映为位置坐标的变化，宜根据应用场景构建相机监测模型，由物方关系将监测点坐标变化转换为监测点变形量，从而分析待测结构的变形情况。

8 监测成果

8.1 质量控制

8.1.1 变形监测成果检查验收与精度评价应参照 GB/T 12979 的相关条款执行。

8.1.2 监测实施期间内应定期检验基准点稳定性，可人工架设全站仪测量基准点进行校验。

8.1.3 监测实施期间内宜利用规格已知且结构刚性不变的监测对象部件、基准尺等参考物，计算惯性视觉测量结果与参考物尺寸 L 的中误差进行变形监测成果精度评估。中误差 M 计算按如下公式执行：

$$M = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \sqrt{(y_{i2} - y_{i1})^2 + (x_{i2} - x_{i1})^2})^2}{n}} \quad (1)$$

式中：

x_{i1} , y_{i1} , x_{i2} , y_{i2} —分别为测量相机测得的第 i 个参考物两端的水平垂直坐标；

n —为参考物总数。

8.2 变形分析

8.2.1 分析变形监测数据可判别监测对象结构变化趋势，相关变形量超过检测项目需求设定的阈值时，应及时发出预警信息。

8.2.2 变形分析主要包括观测成果可靠性分析、累计变形量和两相邻观测周期的相对变形量分析、相关影响因素的作用分析、回归分析和有限元分析等。

8.3 成果资料

8.3.1 成果资料整理归档宜按照 GB50167 中相关条款执行，并定期编制变形监测报告。

8.3.2 监测报告应包含变形监测记录表（参见附录 B）、监测点位分布图、监测数据分析等。

8.3.3 监测报告编制周期可根据监测项目需求，按周度、月度、季度、年度等频率编制。当监测对象处于施工期或灾害易发期，宜缩短报告编制周期。

附录 A

(资料性附录)

监测点位移计算

A.1 监测点位移计算方法

根据几何关系，测量相机姿态变化前后的监测点位移计算公式如式 (A.1) ~ (A.2)：

$$\Delta u' = k [(\Delta x - \Delta x_c) \cos \gamma - L \sin \gamma] \cos \beta - \beta R \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\Delta v' = k [(\Delta y - \Delta y_c) \cos \alpha - L \sin \alpha] \cos \beta - \beta R \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

Δx , Δy ——监测点在物平面产生的水平位移和竖直位移；

$\Delta u'$, $\Delta v'$ ——监测点在物平面产生水平位移和竖直位移后投影在像平面中的像素偏移；

Δx_c , Δy_c ——测量相机运动产生的水平位移和竖直位移；

k ——从物平面到像平面的尺度因子；

L ——物平面到测量相机光心的水平距离；

α , β , γ ——测量相机运动产生的俯仰角、横滚角和偏转角；

R ——监测点投影点到图像坐标系原点的像素距离；

φ ——监测点投影点与图像坐标系原点连线的水平夹角。

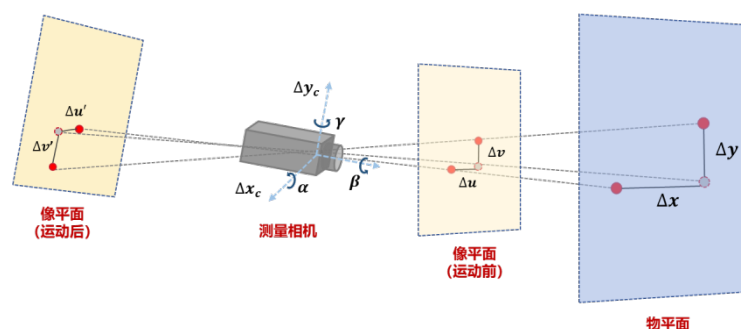


图 A.1 相机运动前后成像关系

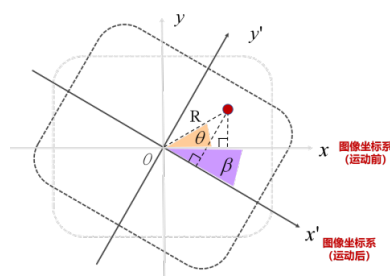


图 A.2 相机横滚运动前后图像坐标系变化

附 录 B

(资料性附录)

某大型结构体表面形变监测记录表

表B. 1为某大型结构体表面形变监测记录表，使用中表题应根据监测项目和监测对象修改。

表A. 1 某大型结构体表面形变监测记录表

序号	测点编号	上次累计(mm)	本次变化量(mm)	本次累计(mm)	累计变化控制值(mm)