

基于多源观测技术的海堤变形监测方法研究

孙永朝¹, 丁 咚^{1,2,3}, 李广雪^{1,2}, 王 蕊¹, 梁泽浩⁴

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验, 山东 青岛 266580; 4. 青岛蓝色地球大数据科技有限公司, 山东 青岛 266500)

摘要: 海堤是沿海地区抵御潮水、防御台风的重要基础设施, 海堤变形监测对于维护海堤安全至关重要。随着技术的进步, 海堤变形监测技术在自动化、精细化及实时化的方向上, 还有发展的空间, 本文针对目前海堤变形监测技术手段, 从空间、地面和水下三个方面入手, 简述各技术手段的特性及其在海堤监测中的应用, 客观分析各技术手段的特点、优势和不足; 在对海堤监测技术手段综合比较的基础上, 提出了建立空间、地面和水下一体化的海堤变形监测系统的建议。

关键词: 海堤; 多源观测技术; 变形监测; 空地水一体化; 监测系统

中图分类号: P714+.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)03-0108-14

DOI: 10.11759/hyxx20200806001

海堤是为防御海潮和风浪的侵袭、阻止岸线后退、保护陆域免遭海水侵蚀, 在海水、陆地交界地带修筑的与岸线平行的防护性构筑物, 是一种广泛应用的海岸防护形式^[1]。目前, 我国各类海岸堤防超过 26 万公里, 创造了巨大的环境效益、社会效益和经济效益^[2]。

海堤安全监测是通过各种监测手段对海堤主体结构、海堤基础、使用环境及相关设施进行监测和分析。主要监测内容包括海堤变形、海堤渗压、海堤地基沉降, 以及潮位、波浪及海堤使用环境的监测, 通过对监测数据的综合分析, 评估海堤是否处于安全运行状态^[3]。在众多的监测项目中, 变形监测能够直接有效地反映出海堤是否处于安全运行状态, 因此, 海堤变形监测是海堤安全监测中最重要的监测内容, 也是首选和必选的监测项目^[4]。

由于特殊的地理位置、独特的地质条件及复杂的构筑材料等原因, 海堤的运行工况比一般的水工建筑物更为复杂, 承受的风险更大, 而且触发变形的因素更多且更强力。在以上因素的综合作用下, 海堤极易发生形变, 如果变形量超过海堤设计阈值, 就会引发裂缝甚至溃堤, 进而带来较为严重的后果。本文从空间、地面、水下三个方面对现有海堤监测技术手段进行分析, 探讨多种变形监测技术在海堤变形监测中的可行性、适用性以及各自的优势, 提出可行的海堤综合监测方案, 为未来海堤变形监测提

供思路。

1 技术手段

1.1 空间对地监测技术

1.1.1 GNSS 技术

GNSS(global navigation satellite system)是所有卫星导航系统及其增强系统的总称, 包括美国的 GPS 系统(global positioning system)、俄罗斯的 GLONASS 系统(global navigation satellite system)、欧洲的 Galileo 系统(galileo satellite navigation system)以及我国的北斗系统(beidou navigation satellite system, 简称 BDS)。GNSS 已经广泛应用在大坝、桥梁、公路、铁路等城市建筑以及滑坡体、冰川等地质体^[5-8]变形监测领域。GNSS 相对于传统测量手段具有无距离限制、无需通视、全天候作业、自动化程度高等诸多优点, 而且在定位精度上也相当可靠。GNSS 在

收稿日期: 2020-08-06; 修回日期: 2020-09-17

基金项目: 国家重点研发计划政府间重点专项项目(编号: 2017YFE0133500), 泰山学者支持计划资助

[Foundation: National Key Research and Development Plan/Key Program for Intergovernmental International Cooperation, No. 2017YFE0133500; Shandong Province: Taishan Scholars Project]

作者简介: 孙永朝(1995—), 男(汉族), 山东淄博人, 硕士研究生, 专业为海洋地质, E-mail: 2279928872@qq.com, 研究方向为海岸带海陆环境信息集成方法及应用; 丁咚(1982—), 通信作者, 男(汉族), 湖北麻城人, 副教授, 博士, E-mail: dingdong@ouc.edu.cn, 专业为海洋测绘, 研究方向为海底地形地貌探测、遥感与 GIS 应用

变形监测时需要在监测点安装接收机，一机多天线系统^[9-10]在保证监测精度的同时大大降低了监测成本，对于远距离传输信号衰减的问题，可以通过电缆或者光纤传输，或者采用 GNSS 信号低噪声放大器来解决，这使 GNSS 用于大范围的海堤监测成为可能。

在实际的变形监测中，由于目标所处环境的复杂性，例如遮挡、基站过少，单星系统的 GNSS 可能面临可视卫星数较少的问题，从而影响卫星定位技术在变形监测中的精度和可靠性^[11]，针对单星系统的劣势，目前开发的多星系统 GNSS 已成为应用的主流。国内外学者已经将多星系统的 GNSS 应用到地壳、建筑物等变形监测^[12-14]中，提出了相应的模型，并开发了相应的处理软件，实验证明，多星

系统极大提高了变形监测精度和可靠性。Barzaghi 等^[5]和 Xiao 等^[15]将 GNSS 应用到大坝变形监测中，水平和垂直方向上获得了毫米级监测精度；王宏晖等运用 GNSS 监测系统实现了 14 km 海堤的自动化形变监测^[16]。

1.1.2 InSAR 技术

InSAR 技术(interferometric synthetic aperture radar, 合成孔径雷达干涉测量技术)是集合成孔径雷达技术和干涉测量技术于一体的空间对地观测技术，变形监测是 InSAR 应用的热门领域之一。为了提高监测精度，学者们相继提出了 D-InSAR 技术(differential interferometric synthetic aperture radar, 差分干涉测量技术)^[17-18]和时序 InSAR 技术^[19-20]，使得 InSAR 技术逐步深入应用于变形监测领域中^[21-24]，如图 1 所示。

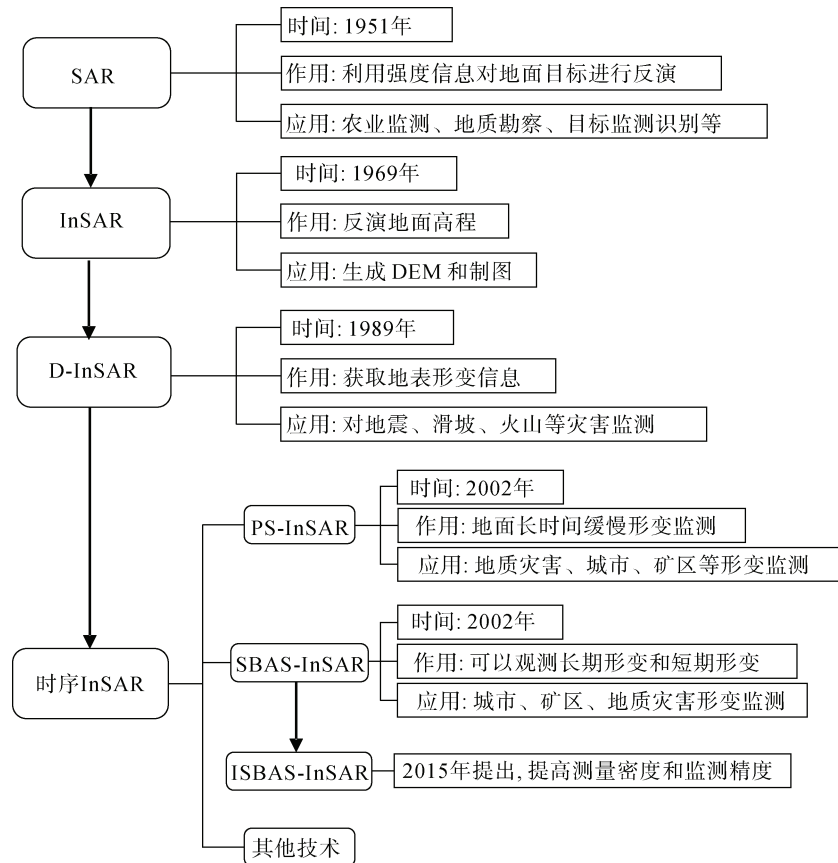


图 1 SAR 技术发展历程

Fig. 1 Development of SAR technology

目前时序 InSAR 技术已经广泛应用在滑坡、城市、冻土等^[25-27]变形监测中。时序 InSAR 的形变监测精度可达毫米级而且空间分辨率远高于各种传统测量方式。InSAR 的特性对于获取地面的准实时动

态变化并进行原因分析有很大作用。海堤作为人工构筑物，使用了大量的混凝土铸件、沥青等，这些物体具有良好的后向散射特性，在 SAR 干涉影像上可以保持较好的相干性。因此使用 InSAR 技术反演海

堤形变具有较好的可行性与精度。裴媛媛等^[28]、Zhang 等^[29]和肖儒雅等^[30]利用 PS-InSAR(persistent scatterer InSAR, 永久散射点干涉测量技术)对海堤进行变形监测, 得到了毫米级精度的监测结果证实了 PS-InSAR 技术应用于海堤监测的可行性和精确性; Pepe 等^[31]利用 SBAS-InSAR(small baseline subset InSAR, 小基线集干涉测量技术)反演了上海沿海地区 2007—2016 年十年间的地表形变, 并进一步提取了某海堤的形变规律。

1.1.3 机载激光雷达技术

激光雷达技术(light detection and ranging, LiDAR)是一种集激光、全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(inertial navigation system, INS)三种技术于一身的系统, 用于获得点云数据并生成精确的数字化三维模型。随着硬件技术的提升, LiDAR 设备的体积逐渐缩小, 可以更加灵活地搭载于各种平台(表 1), 例如时下各种流行的旋翼、固定翼无人机, 以上使得 LiDAR 用途更加广泛。

表 1 机载激光雷达平台对比

Tab. 1 Comparison of airborne LiDAR platforms

平台种类	有效荷载	作业时间	飞行速度	飞行高度	优势	应用限制
有人机	大于 3 kg	120~360 min	150~250 km/h	不低于 100 m	作业时间长, 作业范围大	成本高, 高空管制, 起降场地要求高
飞艇	大于 3 kg	不低于 600 min	30~50 km/h	不低于 100 m	任务荷载大, 滞空时间长	使用成本高, 效率较低
固定翼无人机	1~10 kg	20~240 min	70~90 km/h	50~5 000 m	轻便, 速度快且效率高	不具备悬停能力, 点密度低, 起降场地要求较高
多旋翼无人机	0.8~8 kg	8~120 min	20~30 km/h	50~5 000 m	具备定点悬停能力, 适用于多种使用场景	飞行时间短, 抗风性能较差, 作业范围有限
垂起固定翼	1~15 kg	30~240 min	70~80 km/h	50~5 000 m	兼具多旋翼的起降灵活性和固定翼的作业高效性	使用限制也兼顾二者共有

机载 LiDAR 是一种主动式遥感技术, 与传统测量手段相比, 视野开阔, 可以轻易完成不易接触点位的测量。与摄影测量、光学遥感等技术相比, 机载 LiDAR 能够获得高精度的三维密集点云数据。由于激光具有一定

的穿透性, 在面对一定的地面植被覆盖时, 也可以获取一定的地面目标信息, 多型号 LiDAR 系统(表 2)与无人机的组合, 由于其轻便、航线灵活, 因此特别适用于海堤这种条带型以及植被不复杂的作业环境。

表 2 多型号激光雷达系统比较

Tab. 2 Comparison of multi-model LiDAR systems

项目	华测 AS1300HL	Optech Galaxy	Leica SPL100	RIEGL VQ-1560i
飞行高度	5~1 350 m	150~4 700 m	2 000~4 500 m	最大 5 800 m
绝对精度	垂直: <5 cm 水平: <5 cm	垂直: <3~20 cm 水平: 1/7 500*航高	垂直: <10 cm 水平: <40 cm	综合 20 mm
多回波	是	是	是	是
激光脉冲重复频率	750 kHz	35~550 kHz	6.0 MHz	2.0 MHz
重量	4.35 kg	27 kg	55 kg	60~70 kg

众多学者利用机载 LiDAR 技术调查海岸线变化^[32-34], 随着精度的提高, 机载 LiDAR 也逐渐用于变形监测。2013 年, 宋斯阳^[35]将机载 LiDAR 技术用于小浪底水利枢纽变形监测并将其作为空间数据获取的主要手

段; 2015 年, 陈梦雪等^[36]利用机载和车载激光雷达相结合的方式, 成功对钱塘江海塘的沉降变化和剖面情况作出分析。除此以外, 该技术还应用在滑坡监测、地面沉降监测、沙区变形监测等^[37-39], 都得到了很好的监测效果。

1.1.4 倾斜摄影测量技术

倾斜摄影测量技术是测绘领域近年发展起来的一项新技术, 通过在同一飞行平台上搭载多个传感器或者集成传感器, 同时从多个角度采集影像(表 3),

突破了以往传统摄影测量技术只从垂直方向向下拍摄影像的局限, 是对传统摄影测量技术的极大发展和创新, 现已被广泛应用于城市三维建模、地形测量和自然灾害监测等^[40-41]。

表 3 倾斜摄影测量相机参数

Tab. 3 Parameters of the oblique photogrammetry camera

倾斜相机	飞行平台	影像尺寸	最高影像分辨率
赛尔 102S	多旋翼/垂起复合翼	2 430 万, 总 1.2 亿	1.5 cm
红鹏 AP2600	多旋翼	2.1 亿像素	2 cm
Leica RCD30	运 12 运输机	6000 万~8000 万	6 cm
Leica CityMapper	多机型	8 千万像素 RCD30 倾斜相机 700kHz Hyperion 激光雷达	/

马柏辉等^[42]和胡健波等^[43]利用传统摄影测量技术对海堤进行巡检, 实现了对海堤的准确、有效和低成本监测, 这也从侧面验证了倾斜摄影测量技术用于海堤安全监测的可行性。倾斜摄影测量技术建模速度快^[44], 并且数据精度较高^[45-46], 可以真实还原实地景观并且具有可量测性, 在桥梁和滑坡监测中得到了越来越广泛的应用^[47-48]。倾斜摄影数据通过多角度影像匹配以及后续的立体成像等操作可以生成立体模型以及点云数据, 能够直观表现地形地貌特征和建筑物细节^[49]。马国超等利用三维激光扫描仪和无人机倾斜摄影技术对矿区进行三维测量^[50], 将两种技术获取的点云数据进行融合, 构建了高精度及高分辨率的三维模型, 可实现对矿区地貌的精准描绘, 这也一定程度上为海堤安全监测提供了思路。

面, 测量机器人广泛应用在大坝、隧道、桥梁等^[52-54]环境中, 能实现毫米级半自动化监测。但单台测量机器人易受通视条件和最大目标识别距离的限制(测距只有一千米左右)。对于较大的监测目标, 例如细长的海堤, 单台仪器不能覆盖整个变形区域, 使其应用受到限制, 就这一问题, 卫建东等^[55]设计了基于多台测量机器人的监测网络系统, 监测范围大大增加, 并将其应用在地铁隧道变形监测中; Jiang 等^[56]将 GNSS 和测量机器人结合, 既解决测量通视问题, 又简化了监测程序并降低了监测成本。

1.2 地面监测技术

1.2.3 地面三维激光扫描仪

1.2.1 传统方法

地面三维激光扫描仪(Terrestrial Laser Scanning, TLS)以测站的方式, 连续、自动、快速的采集目标对象表面三维位置信息, 精度可达毫米级, 并且数据采集效率高, 每秒可达百万个点, 例如 Trimble TX8 扫描仪(表 4)。所获取的点云数据信息丰富, 通过对目标对象多期扫描, 可以发现目标表面细微变化。

近年来, 卫星遥感技术、激光雷达技术、摄影测量技术等新一代测绘技术在变形监测中得到广泛的应用, 但是以全站仪、水准仪等为代表的传统大地测量技术仍然是变形监测的主要手段。虽然传统方法有外业工作量大、受地形限制较多、自动化程度低等缺点, 但是仍是目前精度最高、成果最可靠、最简便的监测方法, 在未来相当长的时间里仍将发挥不可或缺的作用。另外, 随着光电技术的进一步发展, 全站仪、水准仪将会更加自动化、智能化, 其效率也会得到一定程度的提升。

TLS 在隧道、桥梁、地面等^[57-59]变形监测中早已广泛应用, 在大坝变形监测中, Alba 等^[60]利用 TLS 对大坝进行观测, 发现 TLS 在点的获取、数据精度、可靠度、易用性上有其他技术无法比拟的优势; Ve-zočník 等^[61]将 TLS 与 GNSS 技术和视距测量技术相结合, 进行长时间变形监测, 结果表明 TLS 不仅可以与其他成熟的高精度测量技术相结合, 而且有助于更全面地了解变形; 王举应用 TLS 对土石坝进行变形监测, 结果证明监测精度能够达到毫米级别, 并且能够实现对大坝各个部分的连续监测^[62]。

1.2.2 测量机器人

1.3 水下监测技术

测量机器人是一种智能型电子全站仪, 能自动进行搜索、跟踪、辨识和精确照准目标, 并获取角度、距离、三维坐标以及影像等信息^[51]。在变形监测方

1.3.1 水下地形测量技术

由于海堤所处的特殊地理环境, 极易受到海水

表 4 Trimble TX8 扫描仪性能参数

Tab. 4 Trimble TX8 scanner performance parameters

扫描指标	1 级	2 级	3 级	扩展模式
最大测程	120 m	120 m	120 m	340 m
单站扫描用时	120 s	180 s	600 s	840 s
30 米处点间距	22.6 mm	11.3 mm	5.7 mm	7.5 mm
反射镜旋转速度	60 转/秒	60 转/秒	30 转/秒	16 转/秒
有效扫描速度	0.5 百万点/s	1 百万点/s	1 百万点/s	0.4 百万点/s
一站总点数	3 400 万点	1.38 亿点	5.55 亿点	3.12 亿点

侵蚀以及风浪侵袭,海堤的迎浪面及坝根部分极易被侵蚀掏空,使坝体安全产生极大的隐患,因此对于坝体的水下监测也是不可或缺的部分,目前单波束和多波束测深技术是水下地形测量的主要技术手段。

单波束测深往往采用单点连续的测量方法,其测深数据分布特点是沿轨迹方向数据十分密集,而在测线间没有数据,最多实现的是从点到线的转变。单波束数据质量相对于多波束而言较低,但是单波束硬件便携,容易操作,适合在滩涂较多、河道复杂的浅水域作业^[63],并且测量成本低,数据处理简单。

多波束测深系统利用换能器基阵向水底发射大角度宽覆盖的扇形声波^[64],能够准确、快速获取沿航线一定宽度范围内水深地形数据,形成该片水域的三维水深地形图。与单波束相比,多波束具有覆盖宽、精度高、效率高等特点,实现水深测量从点到线再到面的转变,能更真实全面的反映水下地形。Lee 等^[65]将 LiDAR 和多波束结合,获得了大坝水上水下三维空间信息;张秋明^[66]利用多波束测深技术对台风过境后的防波堤进行检测,并发现了水下空洞和坍塌。

1.3.2 水下机器人

水下机器人是一种可以代替人在水下完成特定任务的机器装置。水下机器人主要分为载人水下机器人(Human Occupied Vehicle, 简称 HOV)、有缆水下机器人(Remotely Operated Vehicle, 简称 ROV)和无缆水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, 简称 AUV)。ROV 需要工作人员在岸上或船上通过线缆远程操控进行水下作业,可以水下录像和拍摄,能更直观了解工程水下结构现状,具有机动灵活、动力充沛、续航力强和环境适应性强等特点,与其他两种方式相比,成本更低更安全,ROV 更加合适海堤水下巡检。国内外学者将 ROV 广泛应用在海洋工程水下结构监测、水下应急测量、海堤水下维护等^[67-68]。水下机器人和多波束联合作业,还能实现水下近距

离直观观测与水下地形量化扫描。

1.3.3 海陆一体化三维测量技术

传统的陆上地形采集多采用 GPS-RTK 和全站仪,水下地形采集多使用单波束或多波束测深技术,为了快速、高效、精准的获取水域的三维地理空间信息,有学者提出建立水陆一体化三维测量系统^[69],即以船为载体,陆上使用三维激光扫描仪,水下通过多波束测深仪,联合使用 GNSS、惯性导航系统等设备,对水陆进行同步高精度快速测量。

该技术最先在国外兴起,用于海岸线调查、河岸地形测绘、海洋地质灾害调查等^[70-71]。国内起步较晚,但发展迅速,2013 年,中海达研制了 iScan 一体化三维移动测量系统^[72],可以实现数字水利、智能航道、海洋海岛测量、堤岸监测等工作;沈清华等^[73]利用该技术进行河堤险段监测和桥墩侵蚀检测,验证了其用于堤岸安全监测的可行性。

1.4 其他技术手段

测斜仪是一种可以精确测量沿铅垂线方向土层内部水平位移的工程测量仪器,它可以反映土体或结构物某一部位的倾斜度,精度可达到毫米级。将测斜仪应用在海堤变形监测中,可以掌握坝基土体实时位移状态,但是自动化程度较低。

分布式光纤感测技术是以光纤为媒介,感知和传输外界信号的新型传感技术^[74],主要应用在桩基、管道、边坡等^[75-77]监测中,应用在堤坝监测中时可以监测形变和渗流^[78],精度能达到毫米级。分布式光纤感测技术种类繁多,其中基于布里渊散射原理进行感测的技术 BOTDR(Brillouin optical time-domain reflectometer, 布里渊光时域反射技术)、BOTDA(Brillouin optical time-domain analysis, 布里渊光时域分析技术)和 BOFDA(Brillouin optical frequency domain analysis, 布里渊光频域分析技术)(表 5)等对形变更加敏感,广泛应用在变形监测中。

表 5 三种分布式光纤感测技术的技术特点
Tab. 5 Technical characteristics of three distributed optical fiber sensing technologies

技术	BOTDR	BOTDA	BOFDA
空间分辨率	1 m	2 cm~1 m	20 cm
测试参量	温度、应变	温度、应变	温度、应变
最高测量精度	50 $\mu\epsilon$	70 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$
测量方式	单端测量	双端测量	双端测量
测量长度	50 km	80 km	25 km
成本	低	低	高

智能土工织物是近几年新出现的一种技术^[79], 它由含水量传感器和形变传感器组成, 将其铺设在海堤向陆坡的草皮下, 可以检测含水量变化和形变, 从而实现大范围海堤监测。

对于倾斜仪、分布式光纤和智能土工织物等这类的侵入式传感监测技术, 都需要对海堤进行不同程度的破坏来植入传感器, 虽然能够保证较高的监测精度, 但是对传感器性能、铺设技术等要求较高, 且容易受人为因素影响, 可以作为变形监测的重要补充手段。

地面合成孔径雷达干涉测量法(GB-InSAR)是近十年来研发的一种地面有源微波遥感技术。地面合成孔径雷达传感器可以在目标区域获取二维雷达图像, 并测量视线的每个像素的变形分量。该技术已广泛应用滑坡、水库等^[80-81]变形监测中。GB-InSAR (ground-based InSAR, 地基合成孔径雷达干涉技术)

表 6 空间监测主要技术手段比较
Tab. 6 Comparison of space monitoring techniques

技术手段	GNSS	时序 InSAR	机载 LiDAR	倾斜摄影测量
单次监测范围	单点或多点	几十到几百千米	几百米到几千米左右	几百米到几千米左右
精度	精度可达厘米级和毫米级	精度可达厘米级和毫米级	高程精度比平面精度高 低 空飞行精度可达厘米级	精度可达厘米级
效率	高	高	较高	较高
自动化程度	高	较低	较低	较高
数据处理	快	较慢	慢	较快
数据获取速度	快	快	较快	较快
成本	高	高	较高	较高
适应性	易受地形影响	易受大气影响	受天气和地形影响较小	受天气和地形影响大
作业时长	全天候	全天候	受飞行器限制	受飞行器限制
受植被影响	较大	较小	较小	较大
测量方式	被动式	主动式	主动式	被动式
数据形式	三维坐标	干涉图	三维坐标	影像
飞行限制	无	无	有	有
采样方式	逐点采样	大面积	逐点采样	摄影区域

的监测速度快, 可以几秒钟获取 1 km 范围内的图象, 变形监测的理论精度可达 0.1 mm^[82], 主要应用于大型水利工程等变形监测。

2 海堤变形监测系统设计

2.1 海堤变形监测技术特点分析

空间对地监测技术在海堤变形监测中, 最大的优势是工作效率高, 短时间内能够获取大范围的数据, 但是数据精度与可靠性与水准仪等传统测量方法相比较低, 数据处理也更为复杂。GNSS 对海堤能够进行全天候实时全自动监测, 不足是当海堤距离很长时, 需要布设大量的接收机, 导致监测成本增高。GNSS 动态测量精度在厘米级, 而静态测量时可达毫米级精度, 但需要较长的观测时间和更复杂的误差处理模型, 并且 GNSS 测量的高程精度低于平面精度。时序 InSAR 技术可以对海堤分布区进行大范围监测, 相对于传统测量方式其重访周期最短可达五到十二天, 效率有较大提升, 但是相对于 GNSS 的实时观测方式, 其运行周期较长, 不能及时提供实时监测数据, 并且自动化程度较低, 数据处理流程复杂。机载 LiDAR 和倾斜摄影测量技术, 可以快速对海堤进行整体扫描测量, 便于了解海堤的大体情况, 快速获得 DEM(digital elevation model, 数字高程模型)等地理产品, 缺点是设备成本较高, 数据后续处理复杂。空间监测主要技术手段比较如表 6 所示。

地面监测方案在海堤变形监测中,整体精度较高,能监测到细微的变化,但是工作效率低,需要耗费大量的人力物力。以全站仪为代表的传统测量方法,精度可达亚毫米级,但是自动化程度低,数据密度小,只能粗略了解海堤的形变情况;测量机器人精度高,能实现自动化监测,但是测距有限,

且设备成本很高;地面三维激光扫描仪架站后自动采集数据,数据量大且信息丰富,数据精度较高,但是外业工作量大,设备成本高,后续数据处理十分复杂(表 7)。地面监测技术适合对重点变形区域和疑似变形区域进行小区域持续监测,发挥其高精度的优势。

表 7 地面监测主要技术手段比较

Tab. 7 Comparison of ground monitoring techniques

技术手段	传统方法(以全站仪为例)	测量机器人	地面三维激光扫描仪(Trimble TX8)
工作方式	单站架设	长期固定	地面设站,多站点拼接
测程	可达 3.5 km	1 km 米左右	最大可达 340 m
数据精度	可达亚毫米级	可达亚毫米级	可达毫米级
外业作业效率	低	较低	平均 10 min/站
连续观测能力	差	好	差
自动化程度	低	较高	高
内业数据处理	人工处理	自动化处理	慢,较繁琐
数据获取速度	慢,只能获取单点	较慢	可达 1 Mpts/s
成本	低	较高	高
应用范围	测绘领域	建筑物监测	建筑物监测、文物保护等
作业环境限制	不能在危险区域架设,受天气影响	受雨雾等天气影响	不能在危险区域架设,受天气影响

单波束可以在多波束无法开展的浅水域工作,操作简单成本较低,缺点是数据质量较低,沿轨迹数据十分密集,而在测线间没有数据,难以详细了解水下情况;多波束在覆宽、精度、效率等方面有很大提高,能快速获取水下地形数据,缺点是成本高,操作和数据处理复杂,不适合浅水域作业;海陆一

体化测量系统能快速获取水上水下数据,能整体掌握海堤的状况,缺点是成本太高,对设备安装和后续数据处理都有较高要求(表 8);水下机器人提供的图像资料是对其他水下监测技术的重要补充,能够更直观地展现水下情况,缺点是不能给出定量描述,设备成本较高,对水域也有一定的要求。

表 8 单波束、多波束及海陆一体化测量的比较

Tab. 8 Comparison of single beam, multibeam, and sea-land integrated surveys

技术手段	单波束	多波束	海陆一体化测量
横向覆盖宽度	水下单点	测深三倍以上	海陆联测,测深三倍以上
波束	窄波束,获取单点数据	可达到 1024 个	可达到 1 024 个
数据精度	可达厘米级	越靠近中央波束,精度越高	陆上可达毫米级水下同多波束
测点密度	小	大	大
扫描面积	小	更大,更详细	包含水上水下
作业效率	低	高	高
数据获取速度	慢	快	快
成本	较低	高	更高
外业操作	简单	繁琐	更繁琐
内业处理	简单	复杂	复杂

海堤变形监测手段众多,但是没有单一的手段能够全面、高精度和经济有效的实现海堤变形监测。

因此,多技术手段协同监测,建立海堤变形监测系统,是未来海堤变形监测的发展方向。

2.2 海堤变形监测系统设计理念

海堤变形监测系统的建立需要关注以下几个方面:

(1) 监测系统的数据获取要保证全天时、全天候以及可靠性。监测系统能全天候的对海堤进行监测,特别在恶劣天气和恶劣海况(往往是海堤承受破坏压力最大的时候)时期,能够实时获取海堤运行状态数据,并且保证获取数据的精度和可靠性。

(2) 监测系统的数据处理要保证自动化和智能化,构建相应的决策支持系统。能对获取的信息自动化进行处理,减少内业数据人工处理时间,基于智能化的决策支持系统,对处理结果进行判断,能及时对危险情况做出预警。

(3) 监测系统要保证监测目标的全覆盖。海堤运行状况十分复杂,变形可能发生在表面、内部、地基或者水下部位,单一的技术手段不可能对海堤进行全方位监测,多技术融合的监测系统无疑是最好的选择,不仅能保证对海堤全面观测,而且各技术优势互补,可相互校核,从而提高监测可靠性。多监测

手段的融合也使得数据信息更加丰富,可协助决策者对海堤状况有更加准确的认知,准确做出最恰当的决策。

(4) 监测系统要保证经济性。监测系统的建立一定要满足技术角度和经济角度的要求,在建立监测系统的预算内,保证监测系统高质量的监测效果。

(5) 监测系统要具有可扩展性。新技术不断涌现,监测系统应该具有与时俱进和更新的能力,不断淘汰过时的不适用的技术,有能力不断实现系统的升级,保证监测系统的高效。

2.3 海堤变形监测系统设计

导致海堤变形的因素众多,海堤变形破坏往往是地面活动、地下运动以及水动力条件等多要素综合作用的结果,单纯的空间对地监测、地面监测、水下监测无法满足海堤整体性变形监测的要求,因此可以通过三者的结合,实现一体化监测(图 2),多平台、多要素协同的全方位多层次获取海堤变形信息,融合多源数据,也使变形监测更精确可靠,切实掌握海堤运行状况。

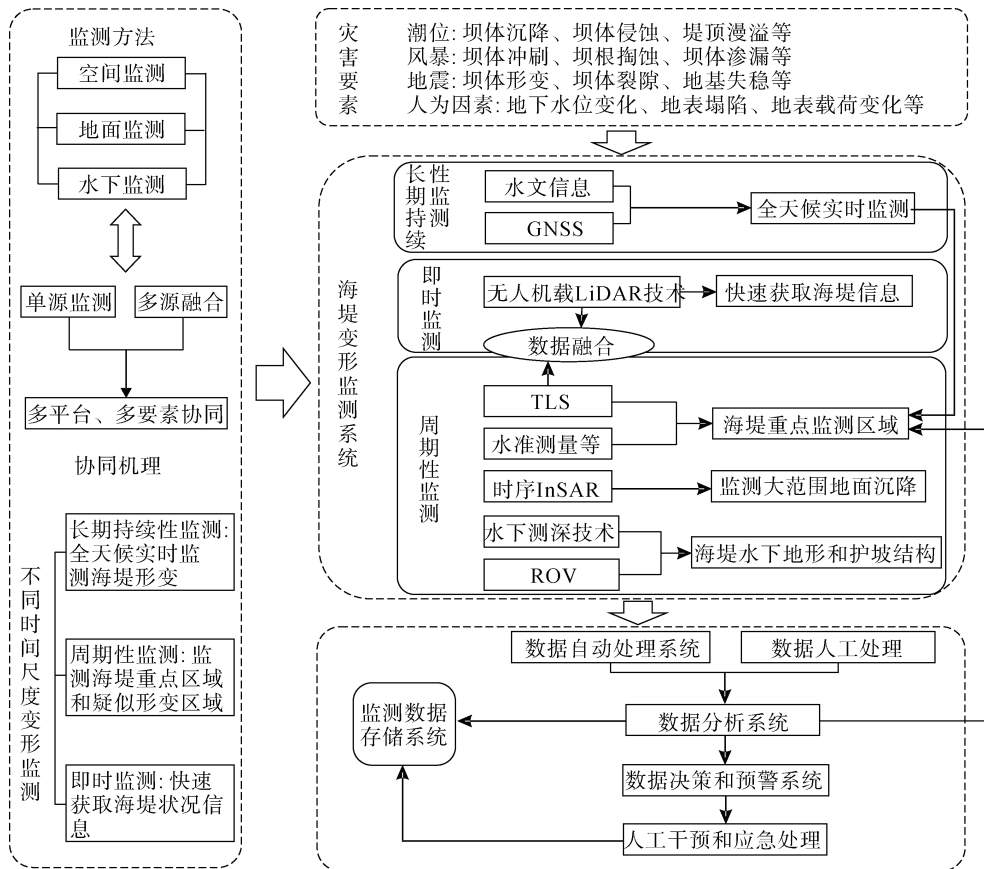


图 2 海堤变形监测系统立体框架

Fig. 2 Three-dimensional frame of the seawall deformation monitoring system

针对海堤变形特点和监测周期，海堤变形监测系统可以设计为长期持续性监测、周期性监测和即时监测：

(1) 长期持续性监测

利用 GNSS 技术对海堤进行全天候自动化监测，在监测点上安装一机多天线 GNSS 接收机，降低成本，采用光纤和信号放大器结合使用的方式向监测中心传输数据，保证数据精度。同时从水文和气象部门获得潮水、恶劣天气等信息，加强对重点区域的监控。

(2) 周期性监测

时序 InSAR 技术可以获取大范围地面形变信息，由此可以用于普查与概查，快速获取海堤变形和疑似变形区域。在这些疑似形变区域使用 GNSS 作为精细化长期化监测手段，方便实时高精度的持续监测。另外为获取普查区域的精确变形量与变形趋势，可以使用 TLS、水准测量等传统技术和无人机机载

激光雷达技术，有针对性的对这些区域进行周期性重复测量，这样可以大大降低传统测量方式的外业工作量，而且能对海堤安全状况有快速准确的了解。水下部分利用测深技术和 ROV 联合作业，监测水下地形变化和护堤结构物。通过上海陆测量方案的实时结合、一体化测量，可以实现同步的、短周期、快速的监测数据获取。

(3) 即时监测

利用无人机机动灵活的特点，可以随时针对突发事件，设计采集方案，使用无人机巡航和检测来快速获取海堤的实时损坏状况。无人机倾斜摄影技术和机载 LiDAR 技术可以快速获取图片或点云数据，特别是当海堤遭受台风、风暴潮等极端天气影响后，无人机倾斜摄影获取的影像和模型数据可以为海堤受损区域定位以及受灾情况评估提供参考，另外，点云数据可以和 TLS 点云数据融合，提高模型精度，海堤变形监测系统如图 3 所示。

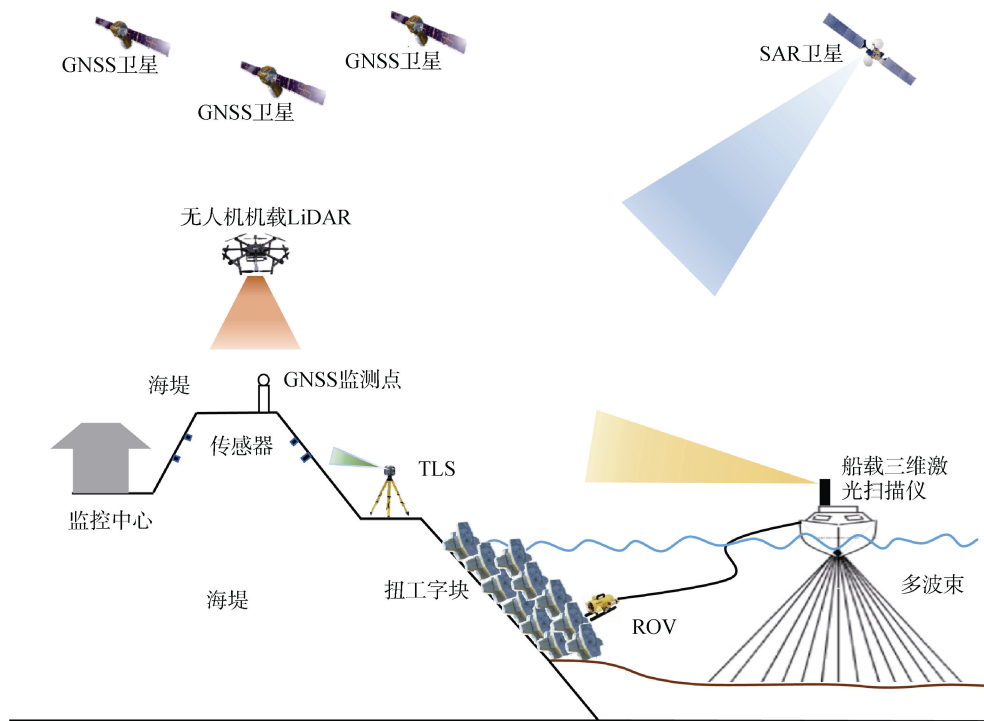


图 3 海堤变形监测系统示意图

Fig. 3 Schematic of the seawall deformation monitoring system

监控中心是海堤变形监测系统的“大脑”，它需要具备数据处理、分析、决策、预警和储存的能力。数据自动处理系统能自动处理 GNSS 全天候监测数据，数据分析系统将其与人工处理以及其他平台数据综合分析，得到海堤疑似变形区域，并分发给海

堤决策和预警系统，监测人员根据监测结果采取相应措施。

3 结语

海堤的变形是评价海堤安全状况的重要指标，

但是目前海堤变形监测系统还不完善,海堤变形监测迫切需要向自动化、实时化、精细化、一体化和智能化方向发展。

本文从空间、地面和水下三个角度分析和总结了目前应用于海堤变形监测的技术手段的特点,比较了各技术手段的优势和不足,根据海堤变形监测系统的需求,结合海堤变形的致害因素,从长期持续性监测、周期性监测、即时监测三个层面的监测要点、系统设计和技术手段选取进行了深入分析,提出了空间地面水下一体化的海堤变形监测方案,为海堤的变形监测工作提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 张荣. 海岸防护工程建筑物类型与效果研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2014.
Zhang Rong. The study of coastal engineering structures design and comparison[D]. Dalian, Liaoning Province: Dalian University Of Technology, 2014.
- [2] 吴正中. 海塘工程安全评价研究[D]. 浙江杭州: 浙江工业大学, 2014.
Wu Zhengzhong. Study on safety assessment of seawall[D]. Hangzhou, Zhejiang Province: Zhejiang University Of Technology, 2014.
- [3] 邢志红. 水利工程的安全运行与优化控制研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2013.
Xing Zhihong. The research of safe operation and optimization control about hydraulic engineering[D]. Baoding, Hebei Province: Hebei Agricultural University, 2013.
- [4] 王秀锐. 水电工程安全监测数据采集系统的设计与实现[D]. 河北保定: 华北电力大学, 2012.
Wang Xiurui. The design and implementation of safety monitoring data acquisition system in the hydropower project[D]. Baoding, Hebei Province: North China Electric Power University, 2012.
- [5] Barzaghi R, Cazzaniga N E, De Gaetani C I, et al. Estimating and comparing dam deformation using classical and GNSS techniques[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 756.
- [6] Carlà T, Tofani V, Lombardi L, et al. Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment[J]. *Geomorphology*, 2019, 335: 62-75.
- [7] Geng J, Pan Y, Li X, et al. Noise characteristics of high-rate multi-GNSS for subdaily crustal deformation monitoring[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(2): 1987-2002.
- [8] Chen Q, Jiang W, Meng X, et al. Vertical deformation monitoring of the suspension bridge tower using GNSS: A case study of the forth road bridge in the UK[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 364.
- [9] He X, Yang G, Ding X, et al. Application and evaluation of a GPS multi-antenna system for dam deformation monitoring[J]. *Earth, planets and space*, 2004, 56(11): 1035-1039.
- [10] 徐勇, 何秀凤, 杨光, 等. 浦东海塘 GPS 位移监测系统[J]. *工程勘察*, 2004, (1): 43-44, 50.
Xu Yong, He Xiufeng, Yang Guang, et al. GPS Displacement Monitoring System for Pudong Seawall[J]. *Engineering Investigation*, 2004, (1): 43-44, 50.
- [11] 吴海金. 多GNSS实时动态变形监测数据处理方法与软件实现[D]. 湖北武汉: 武汉大学, 2018.
Wu Haijin. Research on multi-GNSS real-time dynamic deformation monitoring data processing method and software implementation[D]. Wuhan, Hubei Province: Wuhan University, 2018.
- [12] Xin J, Zhou J, Yang S X, et al. Bridge structure deformation prediction based on GNSS data using Kalman-ARIMA-GARCH model[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 298.
- [13] Paziewski J, Sieradzki R, Baryla R. Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: application to precise dynamic displacement detection[J]. *Measurement Science and technology*, 2018, 29(3): 035002.
- [14] Shen N, Chen L, Liu J, et al. A review of global navigation satellite system (GNSS)-based dynamic monitoring technologies for structural health monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1001.
- [15] Xiao R, Shi H, He X, et al. Deformation monitoring of reservoir dams using GNSS: An application to south-to-north water diversion project, China[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 54981-54992.
- [16] 王宏晖, 毛伟. GNSS 自动化监测技术在海堤监测应用的探索[J]. *水利建设与管理*, 2016, 36(12): 73-76.
Wang Honghui, Mao Wei. Exploration of the application of GNSS automatic monitoring technology in seawall monitoring[J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2016, 36(12): 73-76.
- [17] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas - Differential radar interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1989, 94(B7): 9183-9191.
- [18] 廖明生, 林珏. 雷达干涉测量: 原理与信号处理基础[M]//雷达干涉测量: 原理与信号处理基础. 北京: 测绘出版社, 2003.
Liao Mingsheng, Lin Hui. Radar interferometry: principles and fundamentals of signal processing[M]// Radar Interferometry: Principles and Fundamentals of Signal Processing. Beijing: Surveying and Mapping

- Press, 2003.
- [19] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [20] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [21] 尹宏杰, 朱建军, 李志伟, 等. 基于 SBAS 的矿区形变监测研究[J]. *测绘学报*, 2011, 40(1): 52-58.
Yin Hongjie, Zhu Jianjun, Li Zhiwei, et al. Ground subsidence monitoring in mining area using DInSAR SBAS algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(1): 52-58.
- [22] Sun H, Zhang Q, Zhao C, et al. Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 188: 73-84.
- [23] 张永红, 张继贤, 龚文瑜. 基于 SAR 干涉点目标分析技术的城市地表形变监测[J]. *测绘学报*, 2009, 38(6): 482-487, 493.
Zhang Yonghong, Zhang Jixian, Gong Wenyu. Monitoring urban subsidence based on SAR interferometric point target analysis[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(6): 482-487, 493.
- [24] Mura J C, Gama F F, Paradella W R, et al. Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in Germano iron mining area after the collapse of the tailings dam of Fundão (Mariana-MG, Brazil) using DInSAR techniques with TerraSAR-X data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1507.
- [25] Zhao C, Kang Y, Zhang Q, et al. Landslide identification and monitoring along the Jinsha River catchment (Wudongde reservoir area), China, using the InSAR method[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 993.
- [26] Xu B, Feng G, Li Z, et al. Coastal subsidence monitoring associated with land reclamation using the point target based SBAS-InSAR method: A case study of Shenzhen, China[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 652.
- [27] Zhao R, Li Z, Feng G, et al. Monitoring surface deformation over permafrost with an improved SBAS-InSAR algorithm: With emphasis on climatic factors modeling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 184: 276-287.
- [28] 裴媛媛, 廖明生, 王寒梅. 时间序列 SAR 影像监测堤坝形变研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(3): 266-269.
Pei Yuanyuan, Liao Mingsheng, Wang Hanmei. Monitoring levee deformation with repeat-track space-borne SAR images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(3): 266-269
- [29] Zhang Y, Wan Z, Xie C, et al. Deformation analysis of the seawall in Qiantang estuary with multi-temporal InSAR[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015 (2): 18.
- [30] 肖儒雅, 何秀凤. 时序 InSAR 水库大坝形变监测应用研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(9): 1334-1341.
Xiao Ruya, He Xiufeng. Deformation monitoring of reservoirs and dams using time-series InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1334-1341.
- [31] Pepe A, Bonano M, Zhao Q, et al. The use of C-/X-band time-gapped SAR data and geotechnical models for the study of Shanghai's ocean-reclaimed lands through the SBAS-DInSAR technique[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 911.
- [32] Paine J G, Caudle T L, Andrews J R. Shoreline and sand storage dynamics from annual airborne LIDAR surveys, Texas Gulf Coast[J]. *Journal of Coastal Research*, 2017, 33(3): 487-506.
- [33] Deronde B, Houthuys R, Henriët J P, et al. Monitoring of the sediment dynamics along a sandy shoreline by means of airborne hyperspectral remote sensing and LIDAR: a case study in Belgium[J]. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 2008, 33(2): 280-294.
- [34] Gao Y. Algorithms and software tools for extracting coastal morphological information from airborne LiDAR data[D]. Texas A & M University, 2010.
- [35] 宋斯阳. 水利枢纽数字水利信息系统的分析与设计[D]. 陕西西安: 长安大学, 2013.
Song Siyang. The analysis and design of digital water resource information system[D]. Xi'an, Shanxi Province: Chang'an University, 2013.
- [36] 陈梦雪, 刘洪庆, 许世城. LiDAR 技术在钱塘江海塘工程安全监测上的应用研究[J]. *测绘工程*, 2015, 24(9): 44-47.
Chen Mengxue, Liu Hongqing, Xu Shicheng. Applied research of LiDAR technology in the safety monitoring of Qiantang River seawall construction[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2015, 24(9): 44-47.
- [37] 李显巨. 基于 LiDAR 技术的复杂地质环境区滑坡识别研究[D]. 湖北武汉: 中国地质大学, 2012.
Li Xianju. Research of the landslide recognition based on LiDAR technology in the complex geological environment area[D]. Wuhan, Hubei Province: China University of Geosciences, 2012.
- [38] 张永庭, 徐友宁, 梁伟, 等. 基于无人机载 LiDAR 的采煤沉陷监测技术方法——以宁东煤矿基地马连台煤矿为例[J]. *地质通报*, 2018, 37(12): 2270-2277.

- Zhang Yongting, Xu Youning, Liang Wei, et al. Technical methods for colliery subsidence disaster monitoring using UAV LiDAR: A case study of the Maliantai colliery, Ningdong coal base, Ningxia[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12): 2270-2277.
- [39] 叶光豪, 邓懋懋, 徐文兵, 等. 机载激光雷达技术应用于沙丘变形监测的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 394-401.
- Ye Guanghao, Deng Susu, Xu Wenbing, et al. Application of airborne LiDAR technology in dune deformation monitoring[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 394-401.
- [40] Uysal M, Toprak A S, Polat N. DEM generation with UAV photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill[J]. *Measurement*, 2015, 73: 539-543.
- [41] Toschi I, Ramos M M, Nocerino E, et al. Oblique photogrammetry supporting 3D urban reconstruction of complex scenarios[C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-1/W1, 2017. ISPRS Hannover Workshop: HRIGI 17-CMRT 17- ISA 17-EuroCOW 17, 6-9 June 2017, Hannover, Germany. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-519-2017
- [42] 马柏辉, 林力山. 利用航空摄影测量及多波束水文测量技术监测堆石防波堤及海堤[C]//中国水利学会围涂开发专委会, 中国水利学会围涂开发专委会 2004 学术年会论文集. 中国水利学会围涂开发专委会: 中国水利学会, 2004: 97-104.
- Ma Bohui, Lin Lishan. Using aerial photogrammetry and multi-beam hydrological survey technology to monitor rockfill breakwaters and seawalls[C]//Reclamation Development Committee of Chinese Hydraulic Engineering Society, Papers of 2004 Annual Conference of Reclamation Development Committee of Chinese Hydraulic Engineering Society Set. China Water Conservancy Society Reclamation Development Committee: China Water Conservancy Society, 2004: 97-104.
- [43] 胡健波, 张飞. 基于无人机的防波堤巡检[J]. *水道港口*, 2015, 36(4): 355-358.
- Hu Jianbo, Zhang Fei. On-site inspection of breakwater using UAV[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2015, 36(4): 355-358.
- [44] 刘洋. 无人机倾斜摄影测量影像处理与三维建模的研究[D]. 江西南昌: 东华理工大学, 2016.
- Liu Yang. Unmanned aerial vehicle (UAV) oblique photogrammetric image processing and 3D modeling[D]. Nanchang, Jiangxi Province: East China University of Technology, 2016.
- [45] 谭金石, 黄正忠. 基于倾斜摄影测量技术的实景三维建模及精度评估[J]. *现代测绘*, 2015, 38(5): 21-24.
- Tan Jinshi, Huang Zhengzhong. Three dimensional true modeling and precision evaluation base on oblique photogrammetry technology[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2015, 38(5): 21-24.
- [46] 曹琳. 基于无人机倾斜摄影测量技术的三维建模及其精度分析[D]. 陕西西安: 西安科技大学, 2016.
- Cao Lin. Three Dimensional modeling and its precision analysis based on UAV oblique photogrammetry technology[D]. Xi'an, Shanxi Province: Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [47] Hallermann N, Morgenthal G. Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV)[C]//Proceedings of 7th IABMAS, International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. 2014: 661-667.
- [48] Niethammer U, Rothmund S, Joswig M, et al. UAV-based remote sensing of landslides[M]//International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII(Part 5): 496-501, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, 2010.
- [49] 陈悦. 基于倾斜摄影测量数据的点云划分[D]. 陕西西安: 西安科技大学, 2016.
- Chen Yue. The division of point cloud based on oblique photogrammetry[D]. Xi'an, Shanxi Province: Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [50] 马国超, 王立娟, 马松, 等. 基于激光扫描和无人机倾斜摄影的露天采场安全监测应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(5): 73-78.
- Ma Guochao, Wang Lijuan, Ma Song, et al. Application of safety monitoring in open pit based on laser scanning and UAV oblique photography[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(5): 73-78.
- [51] 张正禄. 测量机器人[J]. *测绘通报*, 2001, (5): 17.
- Zhang Zhenglu. Measuring robot[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2001, (5): 17.
- [52] Yu J, Zhu P, Xu B, et al. Experimental assessment of high sampling-rate robotic total station for monitoring bridge dynamic responses[J]. *Measurement*, 2017, 104: 60-69.
- [53] Zhou J, Xiao H, Jiang W, et al. Automatic subway tunnel displacement monitoring using robotic total station[J]. *Measurement*, 2020, 151: 107251.
- [54] 孙娅彬. 测量机器人在大悬索桥监控测量中的应用[J]. *计算机测量与控制*, 2011, 19(12): 2945-2947.
- Su Yabin. Monitoring application of measuring robot in the big suspension bridge measurement[J]. *Computer Measurement & Control*, 2011, 19(12): 2945-2947.
- [55] 卫建东, 包欢, 徐忠阳, 等. 基于多台测量机器人的监测网络系统[J]. *测绘学院学报*, 2005, 22(2): 154-156.
- Wei Jiandong, Bao Huan, Xu Zhongyang, et al. Research on Monitoring Network System with Georo-

- bot[J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2005, 22(2): 154-156.
- [56] Jiang C, Peng J. Research, manufacture and application of GPS-based surveying robot automatic monitoring system for dam safety[C]//2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. IEEE, 2009, 1: 151-155.
- [57] Xu X, Yang H, Neumann I. A feature extraction method for deformation analysis of large-scale composite structures based on TLS measurement[J]. Composite Structures, 2018, 184: 591-596.
- [58] Mill T, Ellmann A, Kiisa M, et al. Geodetic monitoring of bridge deformations occurring during static load testing[J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2015, 10(1): 17-27.
- [59] Ge Y, Tang H, Gong X, et al. Deformation monitoring of earth fissure hazards using terrestrial laser scanning[J]. Sensors, 2019, 19(6): 1463.
- [60] Alba M, Fregonese L, Prandi F, et al. Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006, 36(5): 6.
- [61] Vežočanik R, Ambrožič T, Sterle O, et al. Use of terrestrial laser scanning technology for long term high precision deformation monitoring[J]. Sensors, 2009, 9(12): 9873-9895.
- [62] 王举. 基于激光扫描技术的水库大坝三维变形动态监测方法研究[D]. 河南郑州: 郑州大学, 2015.
Wang Ju. Research on dam dynamic three-dimensional deformation monitoring based on laser scanning technology[D]. Zhengzhou, Henan Province: Zhengzhou University, 2015.
- [63] 鲁晨阳. 基于机载 LiDAR 与单波束测深数据建立河道 DEM 的研究[D]. 吉林长春: 长春工程学院, 2020.
Lu Chenyang. Research on establishing river channel DEM based on airborne LiDAR and single-beam bathymetry data[D]. Changchun, Jiling Province: Changchun Institute Of Technology, 2020.
- [64] 杨盼. 水陆三维一体化测量系统的集成与实现[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2018.
Yang Pan. Integration and realization of three-dimensional integrated measuring system for water and land[D]. Chengdu, Sichuna Province: Chengdu University of Technology, 2018.
- [65] Lee G S, Choi Y W. The construction of 3D spatial imagery information of dam reservoir using LiDAR and multi beam echo sounder[J]. Spatial Information Research, 2010, 18(3): 1-11.
- [66] 张秋明. 利用多波束测深技术对防波堤检测的应用[J]. 经纬天地, 2019, (6): 59-61.
Zhang Qiuming. Application of multi-beam sounding technology to breakwater detection[J]. Jingwei World, 2019, (6): 59-61.
- [67] 睦翔. 面向海洋工程水下结构检测的 ROV 研制及运动控制研究[D]. 江苏镇江: 江苏科技大学, 2015.
Sui Xiang. Development and motion control research of ROV characterized with underwater structure detection oriented to ocean engineering[D]. Zhenjiang, Jiangsu Province: Jiangsu University Of Science And Technology, 2015.
- [68] Nicolas T, Vincent M, Steven L B. Innovative use of a ROV to control underwater coastal protections[C]//Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 2020.
- [69] Brennan R, Canter P, Rens J V. Surface imaging capabilities on marine hydrographic vessels: The investigation of videogrammetry and laser scanning technologies on a marine survey vessel[J]. Sea Technology, 2007, 48(12): 37-42.
- [70] Alho P, Kukko A, Hyypää H, et al. Application of boat-based laser scanning for river survey[J]. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 2009, 34(13): 1831-1838.
- [71] Mitchell T, Ebuna D, Smith K. Investigations of marine geohazards in coastal zones[C]//2013 OCEANS-San Diego. IEEE, 2013: 1-7.
- [72] 余建伟, 刘守军. 中海达船载水上水下一体化三维移动测量系统[J]. 测绘通报, 2013, (7): 119-120.
Yu Jianwei, Liu Shoujun. Zhonghaida shipborne and underwater integrated 3D mobile measurement system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013, (7): 119-120.
- [73] 沈清华, 邓神宝, 庞远宇. 浅析水陆一体化三维移动测量系统[J]. 水利规划与设计, 2018, (1): 125-127.
Shen Qinghua, Deng Shenbao, Pang Yuanyu. Analysis of integrated water and land three-dimensional mobile measurement system[J]. Water Resources Planning and Dsign, 2018, (1): 125-127.
- [74] 廖延彪, 黎敏, 张敏, 等. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Liao Yanbiao, Li Min, Zhang Min, et al. Optical fiber sensing technology and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [75] Miao P Y, Wang B J, Shi B, et al. Application of feature point compression algorithm to pile foundation detection using distributed optical fiber[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 28(3): 911-917.
- [76] Bersan S, Koelewijn A R, Simonini P. Application of distributed temperature sensors in piping-prone dikes[C]//Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Australian Centre for Ge-

- omechanics, 2015: 475-486.
- [77] Lienhart W. Case studies of high-sensitivity monitoring of natural and engineered slopes[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(4): 379-384.
- [78] Su H, Tian S, Kang Y, et al. Monitoring water seepage velocity in dikes using distributed optical fiber temperature sensors[J]. *Automation in Construction*, 2017, 76: 71-84.
- [79] Krebs V, Quadflieg T, Grimm C, et al. Development of a sensor-based dike monitoring system for coastal dikes[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2017, 1(35): 35.
- [80] Lombardi L, Nocentini M, Frodella W, et al. The Calatiano landslide (southern Italy): preliminary GB-InSAR monitoring data and remote 3D mapping[J]. *Landslides*, 2017, 14(2): 685-696.
- [81] Wang P, Xing C, Pan X. Reservoir dam surface deformation monitoring by differential GB-InSAR based on image subsets[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 396.
- [82] Liu Y, Lee C, Yong H, et al. FastGBSAR case studies in China: Monitoring of a dam and instable slope[C]// *Proceedings of the 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Singapore, 1-4 September 2015, pp. 849-852.

Monitoring methods of seawall deformation based on multi-source observation technology

SUN Yong-zhao¹, DING Dong^{1, 2, 3}, LI Guang-xue^{1, 2}, WANG Rui¹, LIANG Ze-hao⁴

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Lab of Sea Floor Resource and Exploration Technique, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266580, China; 4. Qingdao Blue Ocean Bigdata Technology Co., Ltd, Qingdao 266500, China)

Received: Aug. 6, 2022

Key words: seawall; multi-source observation technology; deformation monitoring technology; integration of space, ground, and underwater; monitoring system

Abstract: A seawall is an important infrastructure in coastal areas to resist tides and typhoons. Monitoring seawall deformation is essential to maintain the safety of seawalls. With advancements in technology, there is a potential to develop systems to monitor seawall deformation using automated, elaborated, and instantaneous technologies. This study focuses on currently used seawall deformation monitoring technology and aims at three aspects: space, ground, and underwater. This paper briefly describes the characteristics of each technology and its application in seawall monitoring and objectively analyzes the features, advantages, and disadvantages of using each technology. Moreover, based on a comprehensive comparison of seawall monitoring technologies, we propose recommendations for establishing a deformation monitoring system that integrates space, ground, and underwater.

(本文编辑: 赵卫红)