

基于“区域—遗产地”两级架构的跨地域石窟寺监测预警平台构建与实践

—以甘肃省石窟寺监测预警平台为例

王小伟 巩一璞

我国现存有石窟寺5986处,甘肃省约有230余处,80%属于省级文物保护单位以下,普遍存在保护能力、管理水平较低的情况。在当前全球气候变化大趋势下,石窟寺易受地质环境、气候变化影响,相关病害的劣化加剧。

如何利用和调配现有资源,有效提升中小石窟寺保护能力、缓解低级别文物安全风险,已成为我国石窟寺保护领域亟待解决的核心问题。按照国务院办公厅《关于加强石窟寺保护利用工作的指导意见》中“统筹推进国保、省保石窟寺保护,对市县级石窟寺给予必要支持”的明确要求,在国家推动文化遗产系统性保护与统一监管的战略背景下,敦煌研究院依托“一院六地”管理模式及莫高窟、麦积山石窟等保护经验,构建了基于物联网与大数据技术的石窟寺群风险综合监测预警平台——甘肃省石窟寺监测预警平台。该平台通过建立标准化的保存状况调查评估体系,研发构建不同规模石窟寺的监测预警系统,为中小石窟寺提供自然灾害预警、设备接入、数据分析、风险处置等标准化工具,有效弥补其预防性保护技术能力短板,对推动我国石窟寺系统性保护具有实践价值。

平台构建技术框架

平台以风险管理理论为核心指导,以中小石窟寺群预防性保护标准化技术与能力建设为需求牵引,遵循“统一规划、分级管理、资源共享、精准预警”的设计原则。平台技术框架涵盖“区域—遗产地”两级监测预警业务体系、监测预警业务支撑体系、遗产地风险监测体系、第三方专业服务及公众服务体系五大模块,各模块协同作用,形成完整的石窟寺风险监测预警闭环。

“区域—遗产地”两级监测预警业务结构设计,主要是针对石窟寺预防性保护发展不平衡现状,实现区域层面的共性服务供给与遗产地层面的个性化风险管理相结合,既降低中小石窟寺监测体系建设成本,又保障监测预警工作的标准化与专业性。区域平台承担共性服务供给(如病害勘察、风险评估、数据管理等),中小石窟寺仅需部署有针对性的监测设备并按标准完成定期人工巡查。

“区域—遗产地”两级监测预警业务体系。针对不同保护管理层级提供差异化软件平台。区域层面聚焦石窟寺群重大风险专项监测,协调跨地域灾害预警与协同处置资源;遗产地层面聚焦个体石窟寺风险监测预警,实现文物保存状态动态跟踪与风险事件快速响应。通过“云+边”架构,区域监测平台部署于专业技术力量雄厚的机构(如敦煌研究院),为各石窟寺提供云端服务,石窟寺仅需布设监测设备并接入平台,即可快速建立标准化监测体系。

监测预警业务支撑体系。针对传统架构下异构传感器接入复杂、数据存储丢失率高、检索效率低等问题,设计了基于大数据技术设计文物风险监测专用数据管理架构。该架构实现多类型传感器便捷接入,以分布式存储与实时计算引擎保障海量数据可靠存储与高效处理,通过智能检索算法提升历史数据查询效率,为平台稳定运行提供技术支撑。大数据底座集成关系型数据库引擎、分析型数据库引擎、对象存储引擎、数据流实时计算引擎等,实现异构数据源集成,海量数据可靠存储与高效计算;共性服务涵盖数据要素目录、监测设备维护管理、数据可视化分析、风险告警规则配置等模块,为全平台提供标准化技术支撑。



遗产地风险监测体系。通过布设多类监测设备、无人机、遥感及人工巡查等多种方式,实现空中、地面和石窟内等多维度实时和定期的监测,涵盖大环境(窟外温度、降水、风力等)、微环境(窟内温湿度、CO₂浓度等)、崖体(位移、裂缝、应力等)、文物本体(壁画颜料层脱落、酥碱等)、游客活动管理等,为风险评估提供全方位的数据支持。

第三方专业服务。通过国家气象、地震、卫星遥感等专业机构推送数据。气象部门提供针对性气象变化预警预报,地震部门提供地震预警速报,遥感机构提供保护区土地利用变化、植被覆盖变化等遥感监测数据,拓展灾害风险监测广度与精度。

公众服务体系。面向公众提供石窟寺基础查询、风险预警信息发布、旅游参观提示等服务,提升公共文化遗产保护意识;面向科研人员提供监测数据检索、订阅与分析工具,支撑石窟寺保护领域学术研究,推动科技与文化融合。

甘肃省石窟寺监测预警平台(一期)的应用实践

甘肃省石窟寺监测预警平台(一期)以敦煌研究院所辖莫高窟、麦积山石窟、炳灵寺石窟、榆林窟、西千佛洞、北石窟寺为实施对象,在现有监测业务基础上,搭建“省监测中心—遗产地”两级业务体系,实现六处石窟文物保存状态动态评估、重大自然灾害统一预警、个性化风险实时监测与风险事件闭环处置,提升预防性保护工作水平。同时,以榆林窟所辖下洞子石窟为示范点,探索无电、无网络覆盖条件下中小石窟监测体系建设方案,为后续全省推广奠定基础。

保护成效。平台通过标准化工具模块(保存状况调查评估、设备接入管理、数据分析挖掘等),解决了石窟寺监测预警体系标准化难题,为病害精准治理提供决策依据。使六处石窟形成“监测—预警—处置—反馈”的风险管理闭环,推动预防性保护从“被动响应”向“主动预防”转变,实现保护工作的全面、协调、高质量发展。

经济效益。实时监测与风险预警可及时调控环境风险因素,减缓文物劣化速度;巡查机制可快速发现早期病害,避免病害恶化导致的高额修复费用;平台共享业务支撑体系可避免中小石窟寺重复建设费用;标准化监测模块可前期预研人投入;区域监测中心统一负责责任平台运维,解决中小石窟寺运维人员短缺问题,对比传统独立建设模式,文保经费使用效率显著提升。

社会效益。平台通过公众服务体系及时发布气象预



警信息,提醒游客及早规划旅游路线;实时监测数据为石窟寺开放容量调控、参观路线优化提供科学依据,在保证文物安全的前提下,提升游客参观体验水平。信息的发布也有助于引导游客关注文化遗产保护,提高文物保护意识。

总结和展望

甘肃省石窟寺监测预警平台通过“区域—遗产地”两级架构设计,整合物联网、大数据等技术与第三方专业服务,有效解决了中小石窟寺预防性保护能力不足的问题,在保护成效、经济效益与社会效益方面取得显著成果。“风险监测—综合预报—提前预警—及时处置”的科学保护模式,实现了从被动抢救向预防性保护的转变,提升文物科技保护水平,为文化遗产可持续发展提供保障,为我国石窟寺系统性保护与统一监管提供了可借鉴、可推广的模式。

随着技术创新与应用拓展,平台将进一步强化人工智能技术在平台中的应用。基于海量监测数据,结合专家经验构建“知识+数据”双驱动的风险因素关联分析模型,提升病害发展预判与文物健康评估精度;探索计算机视觉技术在壁画病害自动识别中的应用,实现病害监测的智能化与自动化,为预防性保护措施制定提供更精准的支撑。

在甘肃省文物局的支持下,敦煌研究院正在筹划利用所辖六处石窟寺分布横贯甘肃省的地理优势,以莫高窟、炳灵寺、麦积山为重心,对周边石窟寺进行“技术辐射”,重点完成遗产要素保存状况评估、差异化风险因素识别、灾害预警渠道扩充、数据智能分析能力增强等任务,从而实现全省石窟寺监测预警系统全覆盖,为系统性保护与统一监管提供平台支撑。

(作者单位:敦煌研究院)

云冈石窟的“隐形守护者”： 天然缪子成像解锁文物保护新路径

腾讯探元计划 兰州大学 云冈研究院 大同云冈数字科技有限公司

在山西大同武周山麓,云冈石窟静静矗立了逾1600年。这座北魏的佛教艺术宝库,不仅是中国古代石刻艺术的巅峰之作,更是丝绸之路上东西方文明交融的鲜活见证。其恢宏的造像与繁复的纹样,承载着无与伦比的历史、艺术与精神价值,对其永续保护是我们这代人必须承担的文化使命。

为此,一代代守护者倾注心力。从高精度数字化建档,让瑰宝在虚拟世界中获得“永生”,到日复一日地精细修复,对抗岁月的剥蚀;从多学科的深度研究,解读其蕴含的历史密码,到探索科学的保护体系,现代科技正全方位地为这座千年石窟构筑起一道道坚实的防护屏障。2020年印发的《关于加强石窟寺保护利用工作的指导意见》,要求坚持保护第一,运用先进科学技术提高保护水平。然而,保护之路仍面临严峻挑战,尤其是潜藏在岩体内部的“隐疾”——诸如内部裂隙、渗水通道和腐蚀空腔等结构性病害,这些隐患深藏不露,传统勘探方法如钻孔取样不仅会对其造成二次伤害,且“一孔之见”难以全面掌握复杂的内部结构,使评估整体稳定性变得异常困难。

在这一背景下,“天然缪子成像”的无损探测技术带来了另一种可能。2023年,在“腾讯探元计划”推动下,一项跨界合作正式启动:来自兰州大学的科研团队,携其先进的缪子成像技术,与云冈研究院、腾讯的专家们携手,将目光投向了云冈石窟第7窟至第10窟上方的山体。这项技术巧妙地利用具有极强穿透力的缪子作为天然探针,为山体进行了一次无需开刀的“CT扫描”,无损地透视地层内部,绘制出石窟内部结构与潜在渗水通道,为从根本上解决石窟的结构性病害难题提供了新的科学视角与数据基石。

什么是天然缪子成像

缪子透视成像的核心理念与医学CT扫描异曲同工,旨在无损地揭示物体的内部结构。然而,其独特之处在于,它并非使用人工产生的X射线,而是巧妙地利用了来自宇宙的“天然信使”——缪子。

缪子是宇宙射线与地球大气层碰撞后产生的一种基本粒子,它持续不断地、以接近光速轰击着我们的地球。这种粒子具有极强的穿透能力,能够轻松穿越数百米厚的岩层。在穿透目标物体(如山体或建筑)的过程

中,缪子会与物质发生相互作用损失能量,导致其数量随穿透距离与物质密度的增加而减少,密度越高的区域,能“幸存”并穿透出来的缪子就越少。

基于这一物理原理,研究人员只需在探测目标的侧下方或下方放置高灵敏度的缪子探测器,精确计量穿透后缪子的“存活”数量与抵达方向。通过大量数据的积累与复杂的数学反演计算,便能如同解开一个三维谜题,重构出目标物体内部密度的精细分布,从而清晰勾勒出内部的裂隙、空腔或密度异常体。

因此,这是一项绿色、非接触、无损的内部结构三维成像核技术,它不产生任何人工辐射,不干扰探测目标,为我们洞察大型物体内部奥秘打开了一扇窗口。

云冈石窟缪子成像实践

在云冈研究院、兰州大学与腾讯三方团队的精密协作下,针对第7窟至第10窟的宇宙射线缪子成像扫描工作顺利实施。为确保数据全面精准,团队在石窟内部关键位置精心布设了6个缪子接收点位,构成一个无形的探测网络,开始持续捕捉来自宇宙的“信使”,聆听岩石内部的回响。

经过长时间的数据积累与复杂的三维反演计算,扫描成功生成了覆盖地窟上方区域的精细三维密度分布图。这前前所未有的“透视”图,印证了历史的痕迹。

首先,成像结果清晰地揭示了已知的修缮遗迹。在7至8窟上方,扫描图像中呈现出一个明显的低密度异常区。这一发现与历史档案记录高度吻合,精准定位了古代为加固石窟而进行的回填等修缮工程的遗迹,证明了缪子成像在非侵入情况下追溯历史的能力。

成功重构了位于石窟顶部的“云冈堡”遗址的整体结构。明代的云冈堡城墙结构与周围原生岩体存在密度差异,在三维图像中作为一个连贯的低密度区被清晰地勾勒出来。

发现一处未知结构。在云冈堡城墙的侧下方,图像中赫然出现了一个显著的高密度异常体。这一意外发现指向该区域岩体可能存在异常结构。

云冈石窟的实践证明了缪子成像技术在大型文化遗产结构探测中的独特优势。它不仅能无损验证历史信息,更能主动发现未知异常,实现了从“被动抢救”到“主

动预警”的转变,开启了大型石质文物与土遗址的内部保护的新阶段。

缪子成像在文物保护中的机遇与挑战

机遇:从“被动抢救”到“主动预见”的变革

跨界融合的创新精神:云冈研究院以开放包容的姿态,主动拥抱前沿核技术,树立了典范。这启示我们,文物保护的未来,需打破学科壁垒,推动核技术、人工智能、地质力学与考古学的深度有机融合,在跨界碰撞中催生革命性的解决方案。

构建“预防性保护”科学体系:缪子成像技术的真正潜力在于其预见性。它能将保护工作从灾后补救、前置到灾前预警。通过长期、定期扫描,我们可以建立文物内部结构的“四维(空间+时间)健康档案”,动态监测裂隙发展、渗流路径变化。以此为基础,可构建文物健康监控与风险预警平台,实现对岩体失稳、渗水灾害等的精准预测,为实施干预措施提供关键决策依据。

解锁未知的历史信息:该技术能非侵入式地揭示封堵的洞窟、古代的修缮痕迹、未探明的墓室或建筑基址,为考古学研究提供前所未有的内部视角,成为解读历史之谜的钥匙。

挑战:从“技术验证”到“深度应用”的路径探索

探测时效与成本:目前缪子成像数据采集周期较长,难以实现快速响应。未来需通过增加探测器阵列规模,开发更高效、面积更大的探测器来提升数据获取速率。同时,需优化扫描策略,建立“异常区域快速筛查”与“重点目标精细扫描”相结合的分级探测模式,以平衡效率与成本。

数据解读与反演精度:将缪子通量数据转换为精准的三维结构图,是一个复杂的数学反演过程,存在多解性。必须持续优化反演算法,可以融合多源地球物理数据进行联合解释与约束,才能不断提升成像的分辨率与可靠性,精准锁定病害体的空间形态。

技术推广与标准建立:将该技术从石窟推广至更广泛的大遗址,面临专业知识门槛和成本的挑战,需要制定行业性的技术规范与数据标准,使缪子成像能作为一种标准化工具,惠及更广大的文物保护事业。

(执笔:王家鑫 姚凯强)

探石窟

—超精建模解千年纹饰

龙门石窟位于国家历史文化名城、十三朝古都洛阳,是5世纪~10世纪杰出的石刻艺术宝库之一。自五世纪末开凿以来,经北魏、东西魏、北齐、隋、唐等朝代接续营造,最终形成了2345个编号窟龛、近11万尊造像、2800多品碑刻题记、近80座佛塔的超大型石窟石刻遗迹群落,是中外文明交流互鉴的结晶和中华民族共同体形成发展的历史见证。1961年被公布为首批全国重点文物保护单位,2000年被列入《世界遗产名录》。联合国教科文组织世界遗产委员会认为,龙门石窟代表了“中国石刻艺术的最高峰”,石窟的浅浮雕纹饰作为古代匠人智慧的“立体密码”,以“一刀一刻皆成史”的细腻笔触,记录着佛教艺术中国化的历程——从北魏“秀骨清像”的飘逸灵动,到唐代“丰腴圆润”的盛世气象,每一道不足0.1毫米的刻痕都承载着跨千年的文化基因。

然而,当数字技术试图“唤醒”这些沉睡的石刻时,面临着三大核心挑战:其一,浅浮雕表面刻痕极浅(深度小于0.1mm),传统摄影测量与激光扫描易产生几何失真;其二,石窟体量庞大,需兼顾整体结构与局部细节的超高精度采集;其三,纹饰样式丰富、结构复杂(如莲花洞中的忍冬纹、火焰纹等),传统人工描摹效率低下且难以标准化,而通用AI模型因泛化能力不足难以适用。在此背景下,“探元计划2024”携手龙门石窟研究院、武汉大学文化遗产智能计算实验室,以“场景共创”模式开启技术攻坚。

探索从“技术验证”到“活态传承”的实践路径

团队聚焦“龙门石窟微痕浅浮雕三维建模及纹饰图案的自动理解与建库检索”主题,针对传统三维建模精度难以满足微痕特征提取要求、纹饰图案结构复杂难以自动解析等技术瓶颈,围绕“高精度三维重建”与“纹饰图案自动理解”两大方向,探索涵盖基于精细光度立体的浅浮雕表面高精度三维建模、基于预训练视觉大模型的纹饰图案自动提取识别、数据库构建与多模态检索的完整技术链路。

数据采集与建模试验阶段:选择龙门石窟典型洞窟(魏字洞、莲花洞、古阳洞等)作为样本区域,采用自主研发的精细光度立体技术,在受限的石窟环境中获取浅浮雕局部区域的高质量图像序列,并利用成功构建精度优于0.05毫米精度的三维模型,验证建模方案的可行性与环境适应性。

纹饰图案智能识别与处理阶段:基于图像与三维模型数据,结合预训练视觉大模型展开纹饰图案的自动提取与分类实验,辅以人工整饰,初步建立纹饰图案的图像标注数据集与结构化线描图。

图案数据库构建与功能拓展阶段:围绕纹饰图案的数据存储与应用,聚焦规范化存储、分类标准建立与多模态检索功能开发,构建集图形图像、语义标签、三维信息于一体的数据库系统,为龙门石窟数字资产的研究利用提供有力支撑。

构建“微痕级”采集与智能解析的技术体系

项目在技术方法与应用模式上实现了关键性突破,针对石窟文物数字化中“精度不足”“环境受限”“纹饰难解”“数据不可用”等传统难题,提出了面向石窟场景的整体性解决方案。

在三维建模方面,采用光度立体技术实现适用于石窟环境的亚毫米级三维模型数据生成。项目实现了一种基于精细光度立体的高精度三维重建方法,突破了传统激光扫描与结构光技术在复杂环境下采集精度受限、设备成本高、操作繁琐等问题,仅依赖便携式相机与LED光源即可获取亚毫米级的高质量三维数据,实现了高精度与高适应性的统一,为低成本、高效率的石窟数字化提供了可推广路径。

在多源数据处理方面,实现三维表面刻线与多特征融合约束下的整体点云平差优化机制,兼顾局部细节与全局一致性。结合残差分析与非刚性变形区域的识别定位,精细矫正点云非刚性变形导致的结构错位,显著提升几何连续性与整体模型精度。

在纹饰理解与数据体系构建方面,建立龙门石窟纹饰图案数据库,实现从纹饰识别、分类到建库检索的全过程贯通,解决了“数据零散、难以调用”的问题,具有显著的推广与借鉴价值。

赋能从“数字保护”到“社会共益”的价值转化

项目的价值不仅体现在技术突破,更在于构建了“技术支撑与文化表达并重”的实践路径:

学术研究价值:高精度三维模型与纹饰数据集为研究石窟寺艺术史、宗教史、工艺史提供全新视角。例如,通过对比古阳洞北魏造像与唐代造像的纹饰差异,可揭示佛教艺术中国化的演进轨迹;通过分析莲花洞飞天纹的飘带刻痕,可还原古代匠人的雕刻技法。

文化传播价值:构建“政府—企业—高校—公众”协同的可持续运营生态,通过纹饰数据管理系统实现纹饰的智能管理与二次创作,助力文化传播,让数字保护成果“走进大众”。

社会公益价值:项目实施过程中,团队重视青年人才的培养,建立了集理论学习、实地操作与技术转化于一体的人才培养体系。共有30余名青年研究人员到实地深度参与,涵盖测绘工程、文博、计算机技术、美术史等多个专业方向,人员构成包括研究生、本科生及青年科研人员。参与者参与了数据采集、三维建模、图案识别与数据库构建等不同环节,学习石窟数字化保护利用的完整流程。同时,成员积极参与科普传播,将石窟数字保护的理念与技术成果向更广泛群体进行推广,初步形成了科研、教学与公众教育相结合的人才发展路径。

展望从“不可移动”到“数字可触”的活态传承

未来,“龙门石窟微痕浅浮雕三维建模与纹饰图案自动理解”项目将继续以“高精度建模+智能化分析+结构化知识库”为核心,围绕文化遗产的保护、传承、传播与价值转化等多重目标,拓展技术应用边界,深化成果转化效益,构建可持续发展的数字遗产生态体系。

将持续推进核心技术的迭代升级,重点聚焦精细光度立体三维重建与纹饰图案自动识别两个方向开展深入研究。一方面,进一步优化三维重建算法,提升其在狭小空间、复杂光照和多材质表面等环境中的建模适应性与稳定性,以满足多类型文物高精度数字化的技术需求;另一方面,依托AI技术的快速演进,持续增强大模型在纹饰图案语义识别与自动提取中的准确度与泛化能力,并结合