

数字敦煌项目综述

吴 健^{1,2,3} 俞天秀^{1,2,3} 王春雪^{1,2,3} 等

¹ 敦煌研究院文物数字化研究所

² 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心

关键词：敦煌石窟 数字敦煌 数字化关键性技术 ³ 古代壁画保护国家文物局重点科研基地

数字敦煌项目概况

敦煌石窟是集建筑、壁画和塑像为一体的石窟群，历经千年，其蕴含的丰富内容具有极高的历史、艺术和科学价值^[1]。敦煌石窟的壁画面积约4.5万平方米，是石窟艺术的重要组成部分。彩塑一般位于佛龕、中心柱或者佛坛的显要位置，与壁画内容相辅相成。

由于自然和人为的因素，敦煌石窟的壁画正在逐渐衰退。为了能够永久保存石窟寺的壁画信息，20世纪80年代末，时任敦煌研究院常务副院长樊锦诗首次提出“数字敦煌”概念，旨在利用数字化技术永久、高保真地保存敦煌壁画、彩塑等珍贵资料，并使其能够重复利用。

在美国梅隆基金会的支持下，敦煌研究院与美国西北大学展开合作，共同探索数字化的方法，确定了采用基于轨道的摄影采集和图像拼接方法，采集精度为75DPI，最终完成了22个敦煌石窟壁画数字化。在国内，敦煌研究院与中国科学院、浙江大学、武汉大学等科研院所和高校合作，共同解决了一些特定的技术难题。为使数字化成果的应用能够更广泛，敦煌研究院将壁画数字化摄影采集精度从75DPI提升至150DPI，最终使用了300DPI，某一些特殊应用采用了600DPI。综上，通过制定数字化工作的标准规范，将壁画数字化，将洞窟与彩塑的三维重建、虚拟漫游、多媒体、数据信息管理和艺

术设计等关键技术应用在数字化工程中，并进行工程规模化实施，目前都已取得了大量的成果。

研究、实施与应用现状

数字敦煌项目实施已近30年，经过不断地探索研究与规模化工程实施，目前我们掌握了石窟寺数据采集、加工、存储和展示方面的关键技术，数字化成果已在保护修复、考古研究、美术临摹、展示与传播、艺术再创作等领域得到了广泛的应用。

数字化关键技术研究

数字敦煌项目主要包括石窟寺二维壁画图像、彩塑、建筑、藏经洞出土文物等的采集、加工、存储、传输、交换、服务以及全景漫游关键技术研究等。

壁画图像数字化的关键技术研究

20世纪90年代，敦煌研究院与美国西北大学合作研究了覆盖式的拍摄方式记录壁画信息。具体做法是：采用平行于壁面移动的数码相机，依次对洞窟壁画分幅拍摄，然后把单幅数字图像拼接成整壁的壁画图像，最终得到一幅无痕、完美的高保真原大全景图像。在此基础上，为实现图像从拍摄、拼接处理、图像显示及打印输出等各个环节色彩一致，保证色彩还原的准确性，我们在数字化工作流程中引入色彩管理系统^[5,6]。针对墙面的不平整性，吴健等^[1]提出了基于壁面曲率分析的壁画数字

化摄影采集方法,实现了凹凸不平墙面上壁画的高保真采集;针对狭小空间内立体面的采集问题,余生吉等^[2]采用焦点堆栈技术解决了部分立体面摄影采集的景深问题;针对人工拼接图像效率低、耗时长、依赖于人工经验等问题,贺兆等^[3]提出了基于SURF(Speeded Up Robust Features)的图像智能拼接系统,在满足数字壁画准确性的前提下,具有计算量小、计算速度快的优点;针对壁面不平、相机畸变等因素引起的图像几何形变问题,俞天秀等^[4]通过修正相机的镜头畸变来改善单站壁画照片的形变,进而优化了自动拼接的效果;针对传统壁画数字化工作中缺少位置信息,以及壁画影像变形等问题,黄先锋等^[8]利用激光扫描仪获取点云数据和强度图像,并将强度图像与原始壁面图像配准得到的正射影像纹理映射到洞窟壁面的三维模型上,得到了包含位置信息的壁画影像,并在此基础上利用点云强度图像矫正壁画影像的形变^[23];为了避免石窟图像海量数据传输过程中发生错误,俞天秀等^[9]提出了适应壁画数字化工作流程的层级式校验传输系统,确保了数据传输的完整性;针对高清壁画的实时浏览问题,许端清等^[24]利用CUDA(Compute Unified Device Architecture)¹的并行运算能力生成动态分辨率图像,达到了实时浏览的目的。此外,通过硬件存储设备搭建磁盘阵列,可以建立足够的物理存储和备份空间,确保数据安全^[10]。

彩塑和建筑数字化的关键技术研究

彩塑和建筑数字化技术对应的相关技术领域为文物三维数字化领域。利用激光扫描仪对文物、遗址场景等进行扫描,获取点云模型的技术在近年来得到了较多的研究,也在莫高窟有了广泛的应用^[8]。但该方法忽略了被重建物体的表面颜色信息,尤其对于色彩鲜艳的彩塑来说,这种数字化效果是不理想的。为了使三维模型表面颜色信息实现高保真,有两种解决办法:第一种方法是结合激光扫描仪得到的点云数据和相机拍摄的高精度纹理图像,利用纹理映射的原理得到彩塑或者建筑的彩色三维数字

模型^[12],但该类方法在海量三维扫描数据的模型整合优化、高分辨率纹理贴图映射、文物光反射属性材质信息获取等方面仍存在较多问题,在实际工程中需要投入大量人力进行交互操作;第二种方法是直接通过相机拍摄同一物体多个角度的高精度彩色图像,得到被拍摄物体的三维几何信息和表面颜色信息,结构光方法就是其中一种^[13],其基本思想是利用照明中的几何信息帮助提取景物中的几何信息。随着计算机和数码相机性能的不不断提升,该方法在敦煌彩塑的三维重建中扮演着越来越重要的角色。

全景漫游的关键技术研究

石窟寺全景漫游是利用摄影技术拍摄洞窟全方位的图片,并根据洞窟的不同形制设计不同的采集点。敦煌研究院经过多年的积累与研究,制定了一整套适合石窟寺全景漫游采集、加工的工作流程与规范,取得的成果在“数字敦煌”项目以及对外虚拟现实(VR)技术支援项目中进行了应用检验。

随着虚拟现实技术、增强现实(AR)技术的发展,交互沉浸式的体验为传统文物的传播与弘扬带来了新的手段。利用VR/AR技术并集成现有的数字化成果,就可以搭建一个使用虚拟文物代替实体文物的交互平台。在展览过程中,每套系统由一名用户进行体验,体验过程中用户可以在预先划定好的体验区域内来回移动,查看文物介绍的详细信息,还可以通过平台与虚拟文物进行互动,身临其境地感受石窟,其他围观用户可观看投影屏幕了解展览内容,把不可移动的文物“搬”出莫高窟,让观众可视、可听、可感地体验敦煌艺术。

数字敦煌资源库的构建

“数字敦煌”项目利用现代数字技术拍摄、扫描、获取、存储敦煌石窟和相关文物的信息,并进行图像、视频、音频、三维数据和文献数据的智能关联,建立多元化和集成化的数字敦煌数据库、数字资产管理系统、数字资源永久保存系统(如图1所示)。该项目的实施在实现永久保存敦煌文化艺术资源的同时,为学术研究和多元利用提供了无限可能。目

¹ CUDA 是英伟达(NVIDIA)公司推出的并行计算架构。该架构通过利用GPU的处理能力,可大幅提升计算性能。

前我们已向全球免费共享针对敦煌石窟 30 个洞窟的采集精度为 300DPI 的数字图像和全景漫游节目,来自十多个国家的网页访问共计 700 余万次,并在敦煌学研究、展览、美术临摹、教育等领域得到应用,取得了良好的社会反响。除此之外,藏经洞中包括数万件写卷、世界上最早有纪年的印本书籍和数百幅精美的绢画,是世界上最早最大的纸本档案,也是中世纪艺术的地下宝藏。中国境内丝绸之路其他遗址也出土了许多重要的文物、绘画以及超过 20 种语言文字的写本,这些文物文献流散在世界各地,学者难以利用。这批庞大的文物文献始终是各收藏机构面临的重大挑战,目前尚有大量未被编目以及亟待修复的文物文献^[22]。“国际敦煌档案”是敦煌研究院和国外一些收藏敦煌资料的单位授权梅隆基金会为中国敦煌石窟的壁画及其相关艺术、文献制作的高质量数字图像,并通过学术电子档案将它们重新与敦煌石窟艺术联接起来^[22]。国际敦煌项目(IDP)则是利用数字技术将散落在全球范围内的敦

煌文献制作成电子文献进行整合,目前已经成为最大、最成功的专业数字图书馆项目之一^[22],实现了敦煌学资源在全球的共享,也解决了现实中资源利用和保存的局限性。

工程实施

敦煌研究院依据已经形成的行业标准和工作规范,利用数字化关键技术,实施了敦煌石窟的数字化工程。截至 2018 年,共完成 221 个洞窟数字化摄影采集,141 个洞窟的图像处理,143 个洞窟结构三维重建,45 身彩塑三维重建,2 处大遗址三维重建,144 个洞窟全景漫游节目制作,45000 张档案底片的数字化(如图 2 和图 3 所示)。在完成敦煌石窟数字化的同时,敦煌研究院还积极对外推广文物数字化技术,先后承担了西藏夏鲁寺、新疆克孜尔石窟、山东岱庙、河北曲阳北岳王庙、山西芮城永乐宫、甘肃肃南文殊山石窟、陇南西狭颂摩崖石刻、肃北五个庙石窟、玉门昌马石窟、内蒙阿尔寨石窟等,遍布全国 7 个省 12 处全国重点文物保护单位的文物数字化保护工程,共采集壁画面积为 3629.78 平方米。

在数字化成果的数据管理方面,数据生产、传输、存储及应用全过程中严格按照制定的规范、流程和标准实施,确保文物数字化数据的安全和有效利用。在数字敦煌项目数据管理探索发展过程中,从无到有,逐渐形成“敦煌石窟数据影像档案管理规范”及“信息安全应急预案规范”等操作规范制度。存储设施也随着应用需求和技术的发展更新换代,



图 1 “数字敦煌”资源库网站首页



图 2 数字化成果——莫高窟第 61 窟五台山全图(13.8 米×3.8 米),由 4780 张照片拼接而成

从最早的单机直接存储、光盘备份,发展到 MAC Xsan 磁盘阵列、EMC CX-120 专业存储,后期选择 VMware vSAN。经过这几个阶段的实践应用,综合考虑数据安全、数据处理能力、容量扩展性、业务连续性以及容灾策略,目前采用分布式存储系统以及异地同步备份的存储容灾策略,基本完成了文物数字化数据的永久存储。



图3 数字化成果——彩塑三维重建艺术复原

数字化成果的应用

数字敦煌项目数字化成果包含高精度数字图像、三维重建数据、虚拟漫游节目、多媒体节目、视频节目、动漫等内容。科学技术的发展带动了文物数字化技术的发展,同时也推动了数字化成果在文物保护修复、考古研究、展示与传播、艺术再创作等方面的创新性应用。

文物保护修复

在文物保护方面:首先,高分辨率的敦煌石窟艺术图像能够精确地记录不同类型的壁画病害信息,并为评估壁画修复效果和日常监测、调查石窟壁画保存状况提供了更为准确的依据^[6];其次,利用三维模型数据模拟洞窟内风场湿度环境和灯光照明系统,从而制定保护监测方案^[6];此外,李丑荣等^[20]利用全数字近景摄影测量技术获取大范围复杂地貌崖面的高精度立面地理空间数据,用于文物本体变形观测、动态监测、保护修复等。

在文物修复方面:利用覆盖式拍摄图像拼接技术所获得的高清晰度、高精度的图像资料,为美术

及修复性临摹工作的线描稿起稿提供了技术支持,从而提高了临摹工作的速度、效率,减轻了临摹工作强度。计算机图形学和数字图像处理技术的发展给包括敦煌壁画在内的文物数字化保护带来了全新的理念和革命。其中,基于图像分割和样本学习的一系列方法^[15-17]涌现出来,并设计了交互式敦煌壁画线描生成框架;李永明等^[18]提出了基于 Bézier 曲线的壁画临摹系统,利用线描笔划分段曲线骨架,结合压力笔绘制线描笔划;孙迪等^[19]使用边缘切向流场提取壁画线描图,并完成计算机辅助临摹系统的设计与开发。此外,潘云鹤等^[15]利用高清壁画图像研究了壁画的虚拟演变模拟、色彩虚拟复原、病害虚拟复原、环境监测等保护应用,避免了传统的壁画保护、修复工作对壁画造成的不可逆的伤害。

考古研究

采用传统手工测绘方式绘制考古测绘图的精度和工作效率都很低。现在,利用三维激光扫描技术获取点云,通过数据配准完成数据坐标系的统一,并将点云数据导入到 MicroStation 系统。根据数据的几何特征和点云强度勾勒出洞窟结构和塑像线描图,确定壁画的三维位置,依据拼接图像勾勒出壁画物象的线特征,并且在考古测绘图上按照分幅的图幅大小插入标有坐标数据的网格线,便于后期整理成图,最后计算出图像的准确位置 and 实际大小。采用上述技术绘制的考古测绘图不仅精度高,而且提高了工作效率,从而准确、科学地记录了敦煌石窟艺术的全部信息^[6]。

展示与传播

敦煌研究院多年的数字化研究与工程实施,形成了海量的数字资源,这些数字资源不仅要作为数字档案永久保存,还要使这些成果“活”起来。数字化成果的展示与传播是有效盘活和合理利用文化资源的途径之一,通过对数字化资源深度的价值挖掘、艺术挖掘、素材提炼,再经过敦煌研究院数字化团队潜心研究、精心策划、借鉴互助,呈现了一个主要涵盖实景洞窟复制、沉浸式展示、彩塑三维重建、主题投影展示、虚拟漫游体验、多媒体展示等^[21]多种展示内容与科技、艺术、文化相结合的综



图4 “敦煌不再遥远”数字化展览



图5 数字敦煌文化衍生品

合性展览。从2014年至2019年，敦煌研究院共举办和参与了26场国内外数字化展览（如图4所示）。这些展览展示了文物数字化成果，推动了文物数字化保护工作的全面发展，深层次、多角度、近距离地展示了丰富多彩的敦煌艺术，是敦煌石窟的保护、研究和弘扬工作中不可或缺的一部分。

文化创意衍生品

盘活敦煌石窟数字化资源另外一个重要途径就是文化创意衍生品的开发。通过对敦煌艺术元素的深度挖掘，结合大众生活美学，经过创意设计，开发兼具旅游纪念价值和实用价值的数字敦煌文化衍生品，彰显中华优秀传统文化，弘扬民族特色品牌。

敦煌研究院下属的文化企业——甘肃恒真数字文化科技有限公司设计开发了包括出版物、日用品、数码周边、高保真复制壁画、空间创意装饰画等在内的一系列文创产品（如图5所示），用现代手段重现代丝绸之路文明，将敦煌蕴藏着的丰富历史与文化价值通过产品的形式呈现，取得了良好的社会效益和经济效益。

面临的挑战

敦煌研究院作为丝绸之路上最大的石窟保护研究管理单位，在当前国家“一带一路”倡议背景下，需要在石窟领域的保护、研究和弘扬方面做出积极贡献，同时数字敦煌项目也面临着巨大的机遇和挑战。在信息时代，石窟寺的保护、研究及弘扬各方面都离不开数字化，数字敦煌项目不仅需要完成敦煌研究院管理范围内甘肃六大石窟的数字化工作，也需要对丝绸之路沿线的其他石窟寺进行数字化工程技术实施推广。但是，丝绸之路沿线石窟寺数量庞大，分布范围广阔，环境复杂，形制规格多变，对于如何改进现有数字化技术、规范和标准，使之适应于丝绸之路沿线的所有石窟寺，是一个巨大的挑战。

随着数字敦煌项目的推进,文物数字化成果数据将愈加庞大。目前的数据存储量已有近 300TB,并且还在以每年 30TB 左右的增量逐年递增。如何对这些数据进行安全规范的管理以及广泛有效的利用,是数字敦煌项目的另一大挑战。庞大数据量的规范管理,需要巨大的人力、物力和财力。而广泛有效地应用这些数据,则需要对这些数据进行价值深度挖掘,需要跨学科多专业的团队不懈努力,对这些数据进行学术、艺术方面的持续加工挖掘,使之成为活数据,这将是份巨量的工作。

人民群众在石窟寺文化艺术方面日益增长的精神需求,相关单位及人员在石窟寺保护、研究等方面的专业需求,需要数字敦煌项目尽快完成尽可能多的石窟数字化工作,而目前石窟寺文物数字化工作的进度与这些需求之间的矛盾,是数字敦煌面临的又一个挑战。目前文物数字化信息处理进度不符合信息采集进度,而文物数字化信息采集进度也不能完全满足社会大众及保护研究方面的需求,所以需要继续研究提升石窟寺数字化技术,大幅提高工作效率。

展望

未来,敦煌研究院将继续完成敦煌石窟数字化工作,积极响应国家“一带一路”合作倡议,推动丝绸之路沿线文化遗产数字化事业的传承与发展。运用先进的数字技术,“盘活”不同地域种类丰富的文化遗产资源,突破物理空间局限,将学术、技术与艺术融为一体,构成多元异构的数字文化资源。我们将持续不断地探索与研究文化遗产保护与利用的新模式,为进一步提升中国文化的软实力,推动丝绸之路经济带的发展尽微薄之力。 ■



吴 健

敦煌研究院研究员,敦煌研究院文物数字化研究所所长,著名文物摄影专家与文物数字化专家,主持“数字敦煌”项目 20 余年。主要研究方向为艺术摄影、文化遗产数字化。dunhuang_wujian@126.com



俞天秀

CCF 专业会员。敦煌研究院副研究员,敦煌研究院文物数字化研究所副所长。在读博士。主要研究方向为文化遗产数字化。dhagraph@163.com



王春雪

敦煌研究院文物数字化研究所馆员。理学博士。主要研究方向为计算机图形与图像处理、文化遗产数字化。chunxue_dha@dha.ac.cn

其他作者:丁晓宏 赵 良 金 良

参考文献

- [1] 吴健,张帆,俞天秀,等.基于壁面曲率分析的壁画数字化摄影采集方法研究[J].敦煌研究,2013(1):108-112.
- [2] 余生吉,吴健,王江子,等.敦煌莫高窟狭小空间内立体面摄影采集与图像处理——以莫高窟第 254 窟数字化为例[J].敦煌研究,2012(06):108-112+134-136.
- [3] 贺兆,卢选民,王君本.基于 SURF 的敦煌壁画数字图像智能拼接系统研究[J].现代电子技术,2010,33(16):133-136.
- [4] 俞天秀,吴健,孙志军,等.基于几何形变改善的莫高窟数字壁画图像拼接方法研究[J].敦煌研究,2011(06):91-95+130-131.
- [5] 赵良.色彩管理在壁画数字化工作中的应用[J].敦煌研究,2008(06):72-78+123.
- [6] 樊锦诗.敦煌石窟保护与展示工作中的数字技术应用[J].敦煌研究,2009(06):1-3.
- [7] 石窟寺壁画数字化高保真图像采集处理方法(发明专利).吴健、鲁东明、孙志军、刘刚、孙洪才、刁常宇、张伟文、俞天秀、赵良、李大丁、丁晓宏、杨静(专利号:201210064232.4)
- [8] 基于激光扫描的洞窟壁画纠正与定位方法(发明专利).黄先锋、张帆、吴健、孙志军、俞天秀、方伟、吴渊、许丽鹏、王江子、路育成(专利号:201210299284.X)
- [9] 俞天秀,吴健,赵良,许丽鹏.敦煌石窟海量数据无差错传输系统的设计与开发[J].敦煌研究,2015(03):109-115.
- [10] 吴健.壁画类文化遗产的数字化发展——以敦煌莫高窟为例[J].中国文化遗产,2016(02):34-38.

更多参考文献: <http://dl.ccf.org.cn/cccf/list>