

从“千年军团”到数字觉醒

秦始皇兵马俑宛如黄土深处的“文明样本库”，以成千上万件陶俑、战马与战车为核心，持续向学界与公众释放关于制度、军阵、工艺与审美的关键信息，滋养考古学、历史学、材料科学、艺术史与工程测量等学科的交叉生长。就人类文明史而言，它以体量宏大而类型完整的遗存，提供了认识古代大一统国家组织与手工制造体系的第一手证据，并为全球遗产研究与传播提供了罕见的系统样本。

针对体量巨大、类型复杂、彩绘脆弱的特点，兵马俑考古与数字化工程同步推进：采用非接触高精度三维扫描、结构光与摄影测量，配合材质与彩绘检测，建立多模态数据库；引入碎片识别、断面匹配、缺损推断等智能算法，输出可回溯的虚拟修复方案，并与实体验证闭环衔接；同时通过VR/AR与裸眼3D等方式转化展示，让这支“地下军团”在数字时代获得新的生命形态。

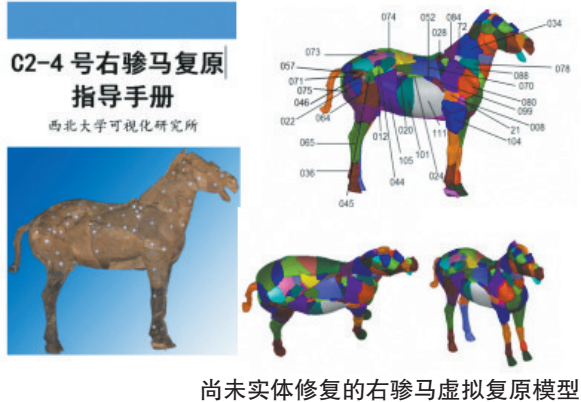
一号坑及相关坑位的田野发掘、库房保护与数据治理协同推进，历年资料已进行系统整理与标准化入库。第三代扫描平台实现分钟级采集、毫米级建模，以“碎片识别+模板引导”的策略显著提升碎片匹配效率，可直接指导实体修复。后续将完善元数据与质控规范，深化兵种类型、工艺流程与彩绘机理的分型统计，推进知识图谱与跨库互联，形成可复制、可推广的数字考古与虚拟修复范式。

数字化扫描技术的研发历程

要实现兵马俑的数字化修复，就需要先将兵马俑转化成能被计算机处理的数字模型，这依赖于高精度三维扫描技术。耿国华、周明全两位教授的团队在国内较早开展文物三维扫描仪研制：1996年承担“九五”科技攻关项目，启动自主扫描设备研发，1997年推出第一代点激光三维扫描仪，最初用于公安部物证鉴定中心的颅骨面貌虚拟复原，随后拓展到文物三维建模。2002年，团队研制第二代线激光三维扫描仪，实现多次曝光的真彩色采集，解决了高反光瓷器表面的扫描难题，并应用于教育部数字考古博物馆等项目。2012年前后，又开发出搭载于无人机的场景三维成像系统，将实景航拍与激光扫描结合，用于秦陵等大型遗址的三维建模，实现不可移动文物的整体数字化。到2020年，团队研制第三代扫描设备，采用结构光扫描、双机械臂与机器视觉技术，可同步获取文物的几何与纹理信息，大幅提升单件文物的扫描效率；由以往动辄数小时甚至数天缩短至数分钟即可完成，精度达0.05毫米量级，满足兵马俑等文物细微特征采集需求。借助该系统，过去扫描一件



第三代扫描仪扫描跪射俑模型的过程与结果



尚未实体修复的右驂马虚拟复原模型

数字「重生」：AI驱动下的秦兵马俑虚拟修复

耿国华 李康 张雨禾 许阳 胡景浩

兵马俑需上千分钟，如今几分钟即可获取完整三维模型。一系列设备的演进，为兵马俑数字化采集提供了关键技术支撑，在提高效率和保持非接触性方面表现突出，为系统获取文物数据创造了良好条件。

虚拟修复与碎片拼接技术

有了三维扫描获取的海量数据，周明全、耿国华二位教授率先将“虚拟拼接”理念引入文物虚拟修复。兵马俑坑出土的陶俑几乎都破碎成大量碎片，且彼此混杂，很难仅凭人工判断哪些碎片属于同一尊俑。团队提出利用碎片的纹理特征和断面边缘特征进行分类匹配。虚拟修复大致分三步：一是用三维扫描精确获取每一块碎片的外形曲面和断裂面数据；二是在计算机中对全部碎片进行运算分析，自动筛选出相互邻近、能够拼合的碎片对；三是在三维空间中完成虚拟拼接，重建完整的兵马俑三维模型，形成计算机辅助文物拼对系统。这一计算机辅助文物拼对系统极大提高了碎片匹配的准确性和效率。传统手工拼对宛如“巨型拼图”，一尊陶俑往往耗时漫长且难保精度。借助虚拟拼接技术，计算机可在较短时间内完成数百碎片的数字拼合，再据此指导人工进行实体粘接，大幅减少人工匹配时间，并避免反复试错对文物造成二次损伤。

2003年前后，团队研制出激光三维真彩色扫描仪等配套技术，可获取碎片表面的真实纹理和颜色，显著提升纹理比对效果。同时，他们提出空间曲线匹配、碎片拓朴关系重建等算法，实现计算机自动识别最佳碎片组合，推动文物虚拟修复取得关键突破。2003年至2007年间，项目组完成秦陵一号坑陶俑碎片的数字化采集与处理，虚拟重建出数十尊完整陶俑模型。“文物虚拟修复和数字化保护技术的研究与应用”成果于2009年获国家科学技术进步奖二等奖，在我国文物数字化保护领域因数字技术创新获此殊荣尚属首次。此后，该技术在青花瓷器、故宫馆藏字画、河南出土青铜器等多类文物上得到应用，表明虚拟可视化与计算机辅助拼接补全正为文物修复开辟新的技术路径。

数字案例实践效果

考古研究与文化传播。通过主持国家重点项目和成立秦陵—西大虚拟考古联合实验室，完成了秦陵一号坑第三次发掘及K9901坑的数字化建模，为考古研究提供了大量可量化数据。虚拟修复的工程化应用验证了智能算法的可靠性与前瞻性，推动修复模式从“经验拼接”向“智能引导”转变。多媒体传播方面，项目开发的裸眼3D展示系统、光影全息展演等新媒体形式，让兵马俑走出展柜、融入现实场景，被英国广播公司、东京广播公司、央视、新华网等媒体广泛报道。数字复原成果通过央视大型纪录片《帝陵》在全球

200多家电视台播出，提升了中华文明的国际影响力。这一成效表明数字化不仅是科学工具，更是文化传播的新引擎，能够带动考古、文化、旅游、教育等多业态融合。

产业转化与地方经济。项目核心技术已转化为数字建模设备、文物展示系统和三维拼接算法平台，广泛应用于博物馆和有关文博单位，构建起数字修复、传播、展演的文化产业链。通过专利转让与平台服务，项目形成了可持续发展的机制，成为地方文旅融合和数字文化新业态的重要支点。这种以科技创新带动产业升级的模式已被实践证明有效，助推了文旅融合、文创开发等新业态的发展。

教育普及与人才培养。周明全、耿国华教授的团队出版了《文化遗产数字化保护技术应用》中英文专著，形成了涵盖扫描建模、三维重建、人工智能、展演传播的复合型人才培养体系。结合世界VR产业大会、欧亚经济论坛等学术活动，为公众与业界普及数字文博知识；通过数字博物馆应用、科普节目、科学夏令营等形式，让青少年亲身体验碎片拼接和虚拟修复过程，增强文化认同感。这种将专业研究成果转化为大众教育的路径，正是数字遗产保护走向社会化、可持续化的重要标志。

AI赋能文博的无限可能

周明全、耿国华教授的前期工作，为构建文物虚拟修复与智能匹配体系奠定了坚实基础。在数据层面，他们已建立起涵盖兵马俑个体和遗址全景的数字资产：包括成千上万的碎片三维模型、多尊陶俑的数字化复原模型，以及约56平方公里秦陵遗址的三维档案，为后续智能匹配系统提供了充足“素材”和训练数据。在技术层面，团队提出的纹理边缘特征提取、空间曲线匹配和碎片拓朴关系重建等方法，本身已具备智能匹配雏形，未来可在此基础上引入机器学习和人工智能，从已拼对案例中持续“学习”，进一步提升碎片自动匹配的准确度和效率。

早在虚拟复原兵马俑实践中，两位教授就提出“先让陶俑在电脑中复活，再交由人工修复”的理念，“数字先行、实体跟进”的模式也被视为智能修复体系的核心思路。基于既有积累，未来有望构建集碎片识别、缺损预测和拼接辅助于一体的智能修复平台，提高兵马俑修复的系统化和自动化水平，缩短从考古发掘到展陈开放的时间。更重要的是，这一系列数字化成果和方法论推动文物保护理念从“抢救性修复”转向“预防性数字保存”：即便不进行实物碎片的拼接修复，也能在数字空间重建兵马俑阵列，让公众和研究者随时“走进”秦陵考古现场、细看每一件文物。可以说，当年工匠用技艺赋予陶俑生命，如今科学家正以数字技术让兵马俑获得“新生”，而他们的研究与积累，已成为后续兵马俑虚拟修复与智能匹配体系建设的重要基石。

（作者单位：西北大学文化遗产数字化国家地方工程研究中心）

科技让文物“长生”——浙江大学文化遗产数字化“基因库”创新实践

黄艳玲

当前，数字技术迅猛发展正深刻重塑着世界文明形态，文化遗产的永久保存与活化传承被赋予了全新的时代内涵。浙江大学文化遗产研究院历经二十余年深耕，以“精准数字化+严谨考古”为核心理念，构建起覆盖高保真采集、智能处理与活化应用完整体系的文化遗产数字化“基因库”。这一实践不仅响应了文化遗产保护技术创新的迫切需求，也为中国文化遗产的数字化保护与全球传播提供了系统性解决方案。

时代命题：文化遗产数字化的困境与求索

文化遗产的多样性与复杂性，让数字化保护面临全方位考验。传统保护方式难以应对文物多样性带来的诸多技术适配难题：不可移动文物如石窟寺、古建筑体积庞大，需多角度、多尺度采集，而光线不足、空间狭窄等复杂环境问题直接影响数据质量；可移动文物如丝织品、书画等脆弱易损，陶瓷、玉石等器物表面反光或结构特殊导致三维建模易失真，大量数据处理仍依赖人工干预，都对数据采集提出了极高要求。

管理应用层面的短板同样显著。资金与技术资源多向国宝级文物倾斜，大量普通文物数字化缺乏经费支持；基层文博机构技术能力薄弱，兼具考古素养与数字技能的复合型人才稀缺；数字化项目多为“一次性工程”，缺乏长期动态维护机制与全国性资源整合平台，难以实现文化遗产信息的持续更新与高效利用。此外，高精度与高效率的矛盾、行业标准的缺失、智能化处理工具的不足、跨学科协作壁垒与知识产权保护以及数据安全与共享的失衡，进一步制约了数字化成果的价值转化，让文化遗产数字化陷入“采集难、处理繁、应用窄、管理散”的困境。

如何突破技术瓶颈，实现文物信息的永久保存、科学研究与公众共享？为了系统回应这些挑战，浙江大学文化遗产研究院给出了答案：构建集高保真采集、智能处理与活化应用于一体的数字化“基因库”体系，突破传统文物保护的技术瓶颈，开启数字时代文化遗产保护、研究与传播的全新范式，让数字技术成为文化遗产“永续生存”的基石。

创新实践：从精准采集到智能应用全流程覆盖

文化遗产的数字化保护是一项跨学科的系统工程。浙大团队以考古学为基础，融合计算机科学、材料工程、艺术史等多学科方法，形成了“采集—处理—展示”的完整技术框架，实现文化遗产数字信息的精准捕捉与高效利用。

精准采集破解多样性适配难题。团队自主研发多源数据融合技术，集成三维激光扫描、近景摄影测量、多光谱成像等多样化采集手段，搭配无人机、手持式扫描仪等轻量化设备，结合智能补充与温湿度监测的自适应环境调控技术，实现微米级、非接触、全要素的信息覆盖。针对不同类型文物特点，团队陆续研发了一系列专用装备与软件系统：为应对纺织品等脆弱平面文物图像信息采集开发高分辨率线性扫描设备，解决大尺幅书画、纺织品精细结构的无损采集难题；在山西水神庙壁画数字化项目中，通过自主设计的颜色管理与还原系统，成功实现明代壁画高保真色彩还原。

智能处理攻克技术转化瓶颈。在数据处理与分析阶段，团队开发了点云去噪、多源数据精准、三维建模与纹理映射等关键技术，建立一套标准化流程以确保数据质量和精准转化。采用激光扫描重建、NeRF神经渲染等技术，实现对复杂结构文物的完整精准重建；引入人工智能算法分析模块，基于大数据提供科学修复方案，实现病害识别、年代判定与知识图谱构建。特别是在龙门石窟项目中，通过AI辅助分析佛首与佛身的数字模型，为文物修复提供了精准的数据支撑，成功实现流失海外文物“身首合璧”的虚拟重现。

活化展示撬动资源“从存到用”。依托WebGL、UE5 Nannite等轻量化引擎，浙大团队利用VR考古、AR导览、3D打印、元宇宙展馆等多样化交互形式，推动文物数字资源从“存档”走向“活用”。其中，3D高保真测量与重建技术的创新应用是一大亮点，团队不仅完成了石窟寺、古建筑及彩塑的高精度采集，还通过3D打印复制实现了文物的异地展览。2017年，云冈第3窟原比例复制窟在青岛落成，创造大型不可移动文物形态与质感精准还原的新纪录；2020年，云冈第12窟通过“积木式”模块化3D打印技术实现整体复制，成为全球首座可移动巡展的石窟，先后在杭州、上海、北京等地展出；“盛世盛典——‘中国历代绘画大系’巡展”中吸引数百万观众的“石窟长廊”、中国历代绘画大系典藏馆中“走进”佛光寺东大殿触摸唐代木构建筑的VR体验，这些数字化成果转化成为丰富多样可感知的文化体验，不仅为濒危文物建立了“数字保险库”，更形成了“限流开放+数字替代”的新型保护模式，成为观众跨越时空沉浸式感受文化遗产魅力的桥梁，实现保护与利用的良性平衡。

体系构建：打造规模化数字资源库

标准化建设促进行业协同。标准统一是数字化共享的前提，不同机构采用的设备与数据格式各异，缺乏统一标准导致数据难以共享整合。为破解文物数字化过程中存在的标准不一、数据孤岛等行业痛点，浙江大学牵头制定《可移动文物三维数字化采集与加工》等8项行业及地方标准规范，建立从石窟寺、古建筑及馆藏文物等数据采集到质量评价的完整标准链。标准制定过程中注重贴合考古学研究需求，如《石窟寺文物摄影测量三维数字化采集规程》明确考古线绘图制的数据标准，实现数字化技术与考古研究的深度融合，为行业发展提供统一“度量衡”，有效推动不同机构间的数据共享与成果整合。

以平台建设支撑资源共享。浙江大学依托“石窟寺文物数字化保护国家文物局重点科研基地（浙江大学）”与“艺术与考古图像数据实验室”（教育部哲学社会科学实验室）等省部级平台，建成容量超500TB的文化遗产数字资源库。资源库涵盖敦煌莫高窟、云冈石窟、龙门石窟、大足石刻、平遥古城（双林寺）、五台山（佛光寺/南禅寺）、大运河（杭州段）等近十处世界遗产，以及全国20多个省市区超220项重点文物数字化工程，覆盖石窟寺、古建筑、壁画、大遗址及馆藏文物等，形成规模庞大、内容丰富的综合性“数字基因库”。平台通过云端交互系统，在保障数据安全的前提下向研究机构和公众开放部分资源，既为学术研究提供丰富一手资料，也推动了文化遗产的数字共享与普惠传播。

实践成效：从田野考古到产业赋能的系统性转化

浙江大学文物数字化体系不仅在技术上实现了突破，更在文化传播、产业发展与人才培养方面产生了广泛影响。

科技让文物“长生”——浙江大学文化遗产数字化“基因库”创新实践

学术研究与考古实践深度融合。团队将数字化技术贯穿考古调查、文物保护与学术研究全过程，形成一系列具有示范意义的成果。与宁夏文物考古研究所合作历时八年完成的《须弥山石窟考古报告·圆光寺区》，成为我国首部系统融合数字化技术的石窟寺考古报告，创新数字测绘、正射影像与考古线图相结合的编写范式；浙江石窟造像专项调查对全省87处石窟寺与摩崖造像进行全面数字化记录，出版《浙江石窟造像调查报告》，为区域研究提供完整基础资料；出版的《雷音洞2012年度考古调查报告》及正在编制的《古阳洞数字化考古报告》《云冈第12窟考古报告》《烟霞洞数字化考古报告》等，进一步完善了数字化考古的方法论体系。多学科协作模式有效解决了文博专家与技术人员沟通不畅的问题，让数字化成果精准对接学术研究与保护实践需求。

产业生态与人才培养双丰收。项目激活“文物数字孪生”新业态，推动3D打印材料研发、数字版权交易、虚拟展览等产业链协同发展，为文化产业发展注入了新动力。专用砂岩粉末市场价因技术推广下降40%，技术成果在文博行业推广应用率达80%以上，衍生经济价值超亿元。

在人才培养方面，团队通过跨学科项目培育了一批兼具考古素养与数字技能的复合型人才，承担10余项国家科技重大专项，形成“考古需求牵引技术研发，技术创新支撑考古研究”的良性互动，为我国文化遗产数字化事业储备了核心力量。

面向未来，浙江大学文化遗产研究院将继续深耕智能采集、AI分析与数字孪生等核心技术，推动构建全国统一的文物数字资源平台，同时，团队将进一步加强国际协作与交流，推动中国文化遗产数字化标准与技术走向世界，通过技术输出、国际巡展等形式，为全球文化遗产保护提供中国智慧与中国方案，助力人类文明多样性的永续传承。

（作者单位：浙江大学文化遗产研究院）



全球首例可移动巡展的复制石窟——云冈第12窟等比例3D打印复制窟在浙江大学首展



自主研发的3D高保真数字测量与重建技术等比例复制“石窟长廊”在中国国家博物馆展出



观众通过VR设备体验“中国古建第一国宝”唐代木构建筑佛光寺东大殿虚拟场景



浙江大学团队使用自主研发设备在山西水神庙进行壁画高精度数字化采集



龙门石窟古阳洞佛龛复制龛展出现场