



李哲向记者展示长城全线实景三维数据库

热点追踪

日前,黄崖关长城博物馆重新升级亮相,微缩模型、沉浸式数字展示等展陈让游客感受到鲜活的长城历史场景和景观特色。黄崖关长城博物馆身处黄崖关长城风景区,它的身后,耸立着包砖垒砌的明长城天津段,更连接着跨越2000余年,绵延几千公里的古代长城遗迹。

长城墙体之外,山体陡峭高峻,山脊形如刀背。长城与自然和谐共生,已成为华夏大地的深刻烙印。天津大学建筑学院教授李哲是黄崖关长城博物馆布展策划人,2003年他加入天津大学建筑学院教授张玉坤所在的研究团队,从此与长城结缘,2018年起,李哲带领团队对明长城全线进行无盲区数字化测绘。近些年,李哲和团队通过数智手段和信息技术,复原长城历史遗迹、挖掘长城遗产的文化内涵、铺就长城文化的传承之路。



李哲向记者讲述明长城天津段墩堡的发现过程



李哲骑沙滩车在野外测绘


**■ 现代航测技术探究古人建设思路
拼接“鳞片”复原长城“千年巨龙”**

黄崖关长城天津段,杨庄水库下,三架无人机正在进行低空航测,李哲带着团队正在寻找新的“宝藏”。

“一架无人机搭载热红外相机,可以过滤树木遮挡,发现遗迹的特征痕迹,另一架无人机正常航测,还有一架无人机灵活钻入树丛进行观察。”李哲分配着勘测工作。今年3月初,他带领团队在黄崖关长城天津段发现了新的墩堡。“看,在热红外下它有很清晰的墩堡轮廓,这个位置的视野极好,往北可以看到杨庄水库的上游,往西顺着河道就是北京平谷,往南顺着山谷可以看到蓟州关城,这里控扼交通要道,当年必定有守兵驻扎。”现场拍回的图片上,墩堡遗址被清晰地展现出来。

“墩堡是藏匿军畜传报烽火的军民两用设施。《万历重修通渭县志》里提到‘二十里为一堡墩’,杨庄水库南的墩堡与黄崖关和蓟州城的距离刚好都是10公里左右,正好是二十里,形制也跟古文描述一致,确定无疑。”李哲兴奋地说道。这一墩堡的发现,使得黄崖关长城与蓟州城在历史上的关联更加紧密。

“长城不仅是一道墙,更是一个巨系统。”天津大学建筑学院副教授李严与李哲共同进行明长城全线测绘和研究工作。李严表示,长城是一个集边墙系统、城池系统、驿传系统、烽传系统、屯田系统和贸易系统于一体的巨系统。

“明长城全长8800余公里,最多时有220万驻军,上百万的军队怎么布防?古代的国防怎么做?古代没有摄像头,古代军事防御体系无法写进史籍里,这都需要我们通过各种史料拼凑,通过实地调研进行复原。”李严回忆道。

2024年夏,李严带领学生前往宁夏南部和甘肃东部地区,寻找新的烽火台遗迹。“古代城与城之间的沟通联系靠的就是烽火台,那是古人的电话。如果把长城比喻成人,烽火台一般分布在长城的腹外和腹内,用于预警和传递军情信息。”经过长时间的研究,李严对烽火台的分布间距控制和古人分布烽火台思路了如指掌。“两个烽火台的间距大概1.3公里,如果以天津大学八里台校区为例粗略估算,大概会有两个烽火台。古人对于烽火台间距、视线可达范围有很高的要求,用古人的思路加上现代手法,我们就能做更多的复原工作。”

李严和团队开着越野车在戈壁浅滩奔波。“黄河流域黄土松散,地图上显示有路,经常开着开着就没有路了。”李严说。穿越河道、汽车抛锚更是常事。“如果靠脚步丈量一天也走不了两个烽火台,无人机的好处显而易见,我在手机地图上标注烽火台可能的位置,无人机飞越山顶飞进沟谷航测,这样能提高测绘效率,也能得到烽火台的详细数据。”找到烽火台遗迹,李严会开着越野车接近山顶,再徒步爬山采集烽火台的材料样本。李严认为,这些样本是烽火台的“基因”。一个月的田野调研结束,李严在宁夏南部地区(明代固原镇地区)新发现了超过200座烽火台遗迹。

“无人机可以围绕建筑物360度无死角拍摄,可以俯拍,也可以钻进建筑内部去拍。”李哲用图片展示着无人机的拍摄轨迹。无人机追随蜿蜒墙体扫描式拍摄建筑的内外侧,平均30米视距超低空拍摄,图像分辨率可以达到厘米级别。这些无人机采集的照片信息均被整理收录于李哲团队自2018年打造的长城全线实景三维数据库。历经6年多,团队跨越辽宁、吉林、河北、河南、山西、宁夏、青海、甘肃、内蒙古、新疆等超过15个省区市,对长城边墙等明长城全线进行无盲区数字化测绘。截至2024年11月,长城全线实景三维图像覆盖超过7000公里精华段墙体,以及烽燧、城堡等,测绘对象从明代长城逐步扩展到战国、秦、汉、北朝、唐、宋、金、清等朝代长城。“目前我们打造了由超过200万张图片构成的世界独一无二的线性遗产图像库。”李哲说。

这些曾经遗落的墩堡、烽火台像是“鳞片”,被团队一点点发现,复原长城这条穿越2000多

以科技为笔勾勒长城新韵

文/林佳



由AI生成创意风景图

年历史的“巨龙”。明长城的军事防御系统从万里大地被逐渐装进数据库。

**■ 数据库开启“上帝之眼”
串联起长城“遗珠巨链”**

甘肃玉门关北,李哲和团队开着沙滩车在湿地里驰骋,露指手套上爬满蚊子。2024年夏天,他带着团队在甘肃进行田野调查,一路穿越沙漠戈壁。团队成员戴着防晒帽、遮面头巾,喷着驱蚊剂,几百只蚊子依然围绕在沙滩车周围。“车子左摇右晃几次快要翻倒,泥水都喷到了大腿根。”李哲和队员好不容易穿过湿地甩开蚊子,暴雨云层又从远处压来。“我们赶紧穿上雨衣雨裤,保证不会失温。”骑着沙滩车穿过雨幕,李哲和团队为了测绘大方盘城而来,这是保存最好的汉代粮仓。

在测绘过程中,他测绘了此前已知的汉代积薪堆。“积薪堆是汉代燃放烽烟的燃料堆,把当地的芦苇或其他草本植物捆成一捆捆草垛,纵横堆起来排列成一个方墩。因为当地极为干旱,这些草料是直接被堆在地上的,未燃尽的草料就被遗存了下来。”李哲解释着积薪堆的由来。

为把积薪堆的测绘数据录入长城全线实景三维数据库,他对比了此前数据库中在内蒙古巴音乌拉嘎查地区的积薪台遗存和天津市古强峪3号烟灶遗存,意外确认了一个穿越朝代、跨越地区的规律。“可以基本确认,在汉代玉门关干旱地区,人们直接把草堆贴地存放和燃烧,到了内蒙古半干旱地区,就需要把草垛放在田字形石堆之上,利用田字形积薪台确保草垛通风,到了明代天津湿润地区,就变革成了四灶门烟灶,也是为了在相对潮湿的环境中抬高积薪隔潮存放。”李哲认为,全线实景三维数据库和无人机开启了“上帝之眼”,除了单体遗址的发现,这种跨越地区和朝代的规律揭示更具价值。

李哲团队的长城全线实景三维数据库厘米级分辨率航拍照片已逾200万张,并自主开发图像库系统以浏览、编辑长城图像,利用图像类人工智能和机器学习技术,实现长城目标人工智能识别提取,首次实现数千公里长城连续三维数字化。

在陕西,李哲同样借助数据库为明长城全线的多烟传烽制度找到了证据链。“多烟传烽制度是中国古代最主要的预警信息传递方法,整个明长城全线从新疆到辽东,我们都能在烽火台附近找到燃放烽烟的烟灶,只有陕西地区还未有突破,如果在陕西找不到烟灶的遗存,怎么把证据链串起来?”他带领团队再次钻进陕西崇山之中走遍所有烽火台。“我们根据无人机拍摄覆盖半径,采取蛙跳模式作业,把所有的烽火台都重新测绘了一遍,始终找不到有力证据,团队十几天的调研一无所获。”李哲说,在他几乎要放弃时,多年来形成的长城全线三维实景数据库成为破局的关键,“我们调阅出明代府谷县地区所有的实景图片,最终在这里发现了烟灶。长城多烟传烽制度体系证据链也建立了起来。”

一直以来,李哲都有个心愿——利用数据库不断地将长城的遗珠串联成链。

**■ 人工智能光谱分析
挖出长城彩色底蕴**

随着长城全线实景三维数据库的逐步完善,如何对已知的长城文化遗产进行再挖掘是摆在李哲团队面前的问题。

工作室里,一盒盒切割均匀的石料被李哲摊开放到桌前细细研究。在多年测绘调研的过

程中,李哲和团队逐渐发现不同地区的长城颜色不尽相同。“长城一直以来被认为是灰色,我们在测绘调研中发现,很多敌台的墙体颜色都不同。西部地区灰色比较多,而到了秦皇岛抚宁地区长城的颜色就非常鲜艳。”为此,他和团队开始了长达3年的彩色石材样本收集工作。“我们发现带有颜色的敌台或长城墙体,就会从其沿线周边已经散落的石头里挑选出带有颜色的材料作为样本。”

长城横跨超过15个省区市,如何了解长城全线的色彩分布?张梦迪是李哲团队的技术核心成员,负责利用图片类人工智能对明长城全线进行色彩统计。“我先从三维实景数据库里找到全线所有可以被识别出来的空心敌台,通过人工智能算法分割出空心敌台的砖石、毛石、条石等不同材质部位,并提取各个位置的主色调,这样就可以得到明长城全线色彩分布情况。借助人工智能,测绘团队再回到长城富彩重点地段进行二次图像数据采集,一架无人机带着校色板,另一架无人机透过校色板拍摄照片,校色板能够消除日光对颜色的影响,这样就能得到准确的色彩情况。”张梦迪说。

借由这套明长城全线色彩统计方法,3年来,李哲和团队在河北、宁夏、甘肃、北京、辽宁、内蒙古、新疆等地区陆续分批收集了不同颜色的石料。“样本带回来会放在玉石切割机里切割成4×4厘米大小,切割完的余料我们会放在研钵里,用玛瑙研磨机把石头细细研磨成粉末,每一块都要几十分钟才能研磨成粉。这些粉末经过干燥箱处理后,去除了所有影响因素呈现出本来的颜色。粉末放在样本瓶里像是水彩画的颜料一样,特别漂亮。”李哲谈起石料颜色滔滔不绝,这些粉末是用来进行光谱分析的样本。

“光谱分析之后会得到石材的金属离子情况,用来分析石料的成分。”李哲和团队经过3年的研究,从吐鲁番煤窑沟戈壁跨越到秦皇岛抚宁平顶峪,进行了长城全线的色彩调查。“现在已知的长城颜色有深红、橘色、绿色、普蓝、深青、冷灰、浅米黄、青紫色等,至少十几种颜色。”李哲说。

最打动李哲的是在平顶峪的三号敌台。“关口左右各有一个敌台,古代工匠挑选出普蓝色的石材专门给这个敌台使用,由于材料珍贵,敌台的四个墙面只铺了一面,这面墙是正对关口的。想象你是一个过关的人,能在高处看到蓝色的漂亮敌台。这样修建敌台的目的是什么?是工匠有意识地进行色彩组织,用颜色展示国门之礼,用修建质量来表征国家实力。”李哲认为,长城的色彩甚至可以上溯到古代“高坚宏丽”的工程评价标准,这项发现填补了古代军事工程在材质色彩方面的空白。

同样,李哲和团队还利用“碳-14测年”技术完成了对长城传烽空心敌台的发现与复原。“敌台是建在长城沿线的防御建筑,本来是具有戍守瞭望、武器储藏和击发火器的功能,文献提到明代蓟镇长城部分空心敌台还兼具烽火台的传烽职能。我们在测绘的时候发现有的空心敌台外墙有白色抹灰。和古籍里提到的‘亦用灰刷白以辨之’相似,这些有可能就是兼具传烽职能的敌台。”李哲和团队在现场取样,回到实验室用放大镜观察到抹灰灰浆样品里有植物纤维。

“这些植物纤维可以用测年技术确定年代。检测结果显示,这些植物纤维的年份是明代。”李哲说,这表明了在明代,承担有传烽职能的空心敌台在立面腰墙以上刷白灰,来跟其他空心敌台相区别。

“我们用新的检测手段和技术在已知的数据库中不断挖掘长城的多重价值,丰富长城的内涵,不断找到新的研究方向。这些既是对历史的复原,也是对长城建筑类型的有力补充,丰富了对长城历史景观原貌的既有认知,这些发现不断展示着长城作为世界文化遗产的魅力。”李哲说完,眼中闪着星光。

**■ AR交互积木搭建
长城“活”在观众“手”里**

扫描二维码,用手机对准沙盘,动画特效浮现眼前:敌军正在逼近长城边墙,燧烟燃起烽烟,长城的燃烽场景被活灵活现地展示了出来。借由自主研发的“北洋数智遗产”小程序,李哲和团队利用AR(增强现实技术)让长城“活”了起来。

“我们尽量让一切做到可视化,AR可以帮助观众理解难以用语言描述的长城子系统,一些隐蔽和不为人知的场景可以展现在观众的手机里,甚至能实时识别手机和目标物的对应位置,这样观众可以自由移动地观看。”李哲拿着手机展示,他和团队正在为天津黄崖关长城博物馆和河北山海关中国长城博物馆设计AR场景,长城背后隐秘而伟大的秘密将链接进观众的手机。

黄崖关长城博物馆主展厅里,士兵在敌台上阻击敌军的场景被模型还原出来,敌台模型是用李哲团队研发的积木搭建。“积木的垒砌逻辑和模块化构建和长城一模一样,技术层面上实现长城具象化,用积木来呈现特别合适。”李哲说这是积木表现长城的初衷,做“砌长城”积木玩品牌的梦想也应运而生。

从2023年开始,李哲带领天津大学建筑学院的本科生开始实施长城积木产品的一系列开发。“首先是画长城构件积木模块的草图,再根据草图在软件里建模。”施雯馨是“砌长城”积木产品大学生团队成员,在李哲的草图指导下,普通城墙砖、拱券砖、基础条石、窗槛石、垛口石……30多种长城构件被画成设计图。“有了基础构件,我们再结合各种形态的空心敌楼、垛墙防御、烽烟设施等这些建筑元素深化设计积木组件。”施雯馨说。

在李哲的工作室里,积木构件通过三维打印机被打印出来。“第一批零件打印出来以后,我们在老师的实验室进行了拼装,后面就根据李老师的意见不断调整积木接口的尺寸,进行模型迭代。”施雯馨说。

李哲带领学生用积木做出了长城的颜色。“要通过不同灰度和彩度的砖去还原长城的真实色彩。”这是李哲的要求。积木甚至把长城的碹洞也复刻了出来,李哲细数了积木的细节:“碹洞是明长城墙体上修长的圆弧形溜槽,石碹等武器可以通过它击退墙根处的敌人。带有碹洞的砖每一层尺寸都不同,积木就需要修复很多细节。同时,主墙体是下大上小的结构,每一块砖的尺寸也有细微差别,所以我们真正做到博物馆级的积木。”

由积木搭建的长城在中国建筑科技馆、呼和浩特《长城长》电视知识竞赛等亮相。“不亲身体验,我们不会知道搭建一个敌楼需要2万块砖。这是一种文化传播的体验感,从长城的旁边观者变成了亲历者。”李哲认为,结合实物遗存和真实历史可以设计更多积木场景,建筑造型变化、复现历史场景、长城的科普知识、建造成就、设计智慧、内涵价值、家国精神都通过积木延伸了出来。长城作为文化符号的意义由抽象走向了具体。

长城正在从广袤土地通过科技赋能走入观众的生活,“活”在观众手中。“长城是中华民族的图腾,它背后隐藏的历史场景不断被遗忘,我们的工作就是找回长城丢失的记忆。想要传承长城文化遗产不能光喊口号,需要亲身体验。所有的工作都是一个目的:挖掘长城文化遗产的多重价值,让过往更加鲜活。长城从大地来终将回归大地,我们能做的就是不断地把长城文化传承下去。”李哲身后,万里长城傲然耸立。