

4年多时间,研究人员跨越10个省区,对明长城全线进行无盲区数字化测绘,采集到200多万张实景图片,并建立了长城全线实景三维数据库,目前已覆盖90%的人工墙体段,并已扩展到汉、北朝、唐、宋、清等多朝代遗存。

把长城“搬进”博物馆要几步



上图 突门手绘复原图。
左图① 突门外侧洞口遗存现状。
左图② 突门外侧封堵边缘示意图。

深瞳工作室出品
采写:本报记者 陈曦
策划:赵英淑 滕继濮 林莉君

在两千多年的时光冲刷下,长城早已从农牧经济藩篱,演化为承载历史的文化血脉。人迹罕至处,历经岁月侵蚀和自然风化,这道历史奇迹渐渐沾染上岁月的痕迹,藏在其中的秘密也在渐渐隐去。

科研团队利用最新科技对长城进行测绘,以期获得精准数据,用数字手段复原长城。虚实之间,发现长城。

“我们驾‘飞机’乘‘坦克’,循着古代典籍的线索,去探索长城的奥秘。”不久前,在天津博物馆举办的天津大学长城研究和数字成果展上,天津大学建筑学院研究员李哲感慨道。

李哲身后,几千年的历史和现代科技在这一刻交汇。

从2003年开始,李哲所在的天津大学建筑学院教授张玉坤团队就与长城结缘,2018年底启动了“长城全线实景三维图像”采集工程。

4年多时间,该团队跨越10个省区,对明长城全线进行无盲区数字化测绘,采集到200多万张实景图片,并建立了长城全线实景三维数据库,目前已覆盖90%的人工墙体段,并已扩展到汉、北朝、唐、宋、清等多朝代遗存。

无人机测绘轻松采集长城海量实景图

“你看到长城上这个不起眼的洞了吗?用肉眼,可能觉得这就是一个破损,容易忽略。”李哲指着照片对科技日报记者说,“基于长城全线实景三维数据库,在AI技术辅助下发现这些疑点图像并再次实地踏勘,我们就能甄别出这是长城的暗门。”

多数新发现都是基于对长城全线三维图像的掌控,而海量实景图图片的拍摄则是基础中的基础。

之前国家文物局曾联合国家测绘局等单位进行长城资源调查,已经把长城的长度、坐标、年代、保存基本状况等信息都搜集得很完备,但有关长城的细节、设施调查比较缺乏,比如长城病害的全线分布位置在哪,长城的细节构造、设施和装饰等。长城全线实景三维图像的采集工程正是要补上这缺少的一环。

李哲认为,这项工作不能盲人摸象,只看局部,全面了解也不能是粗线条勾勒,而是要做细账。

“做细账要求数据的颗粒度要细,即采集到的照片分辨率要精细到能看到每一块砖缝,同时还得多角度连续性的。”李哲说,之前的资源调查工作平均每公里只获得8张代表性照片,而此项工程每公里需要采集距离均匀、多角度照片约300张。

长城蜿蜒数千公里,大多地处偏远,多盘踞在险峻陡峭之地,使用卫星、载人飞机等高空遥感测绘手段,很难拍摄到长城的各个面。且由于城墙在三维空间上扭曲分布,若观测者身处其中则无法判断整体布局。

“高空拍不全,站在地面拍摄,有时连落脚的地方都没有。”李哲介绍,团队从2004年起就开始将无人机低空信息采集技术应用其中,无人机测绘的精细跟随时、扫描式的作业以及多功能化可完成多种数据采集的能力,使其成为此次工程最为高效的数据采集手段。

无人机能沿着蜿蜒的墙体,对长城的侧面、顶部,甚至是敌楼室内进行详细的探查。作为载体,无人机还能携带不同的传感器变身不同功能的测绘设备。“无人机+普通相机”,可以进行拍摄、航测;“无人机+红外相机”,可以对长城进行热辐射量成像,从而探查长城的一些内部构造或者隐蔽设施;“无人机+激光雷达”,可以用激光从空中扫描树下遗迹,再通过技术手段把树的数据“剥离”出去,就可以清晰地看到隐藏在树下的长城图像。

有了无人机测绘助力,数据采集如虎添翼,团队成员李严深有感触。

“先有城后有墙,镇城、路城、卫城、所城、堡城也是长城防御系统重要组成部分。”负责城这一部分测量的李严告诉记者,最初测量周长都是靠人工步行、皮尺丈量,速度慢不说,如遇到两个山包间修建在山坡上的墙体,皮尺就无能为力了。应用传统测绘手段,一天最多测量两个城,而无人机测绘,飞上一圈只需10分钟,就能把整个城的数据完整地采集到。

不过使用新型的测量方法也往往会带来很多问题,在这个过程中最需要关注的就是不同的环境问题。大到环境温度、湿度,小到所配备的电池等,都会对作业安全有影响,是测量中需要考虑到因素。

“其实不仅是三维数据采集,测量一开始就要探求在极端不理想的条件下(比如各种遮挡),如何优化无人机测量的航线。”李哲说。

因此,在每一次测量前,团队都会详细商讨地形之中是否存在干扰性的障碍物,拍摄过程中遇到干扰的安全处理措施,拍摄过程中的最佳航线等。正是这一次又一次的精益求精,换来如今覆盖范围广而又连续、详细的三维数据。

三维建模技术把长城“搬进”博物馆

该团队用了4年多时间,完成了大约5500公里的长城摄影测量用图像采集,建立了200多万张长城实景图构成的连续图像库。其中以明长城为主干并占绝大部分,也发散到清代较为分散的墙体遗存,以及唐、北魏、东魏和汉代等历朝历代所修建的长城部分,整体范围覆盖了从沈阳以西到库尔勒以东。

“每一张照片的坐标都呈现在一个WebGIS(网络地理信息系统)环境下的库里面,实现了长城浏览自由。”李哲指着屏幕说,这是金山岭长城,可以放大到厘米级清晰度,每一个灰缝都能看清楚,世界上没有任何一个国家有这种连续的长城的图像库。

用好这些珍贵而海量的实景图数据,是一个不断发掘价值的过程。

李哲坦言,在长城测绘的起步阶段,自己是有些懵懂的,最初仅仅是想要拍摄能够全面覆盖长城的多角度的照片,拥有大量详实的长城图像资源。

“为长城全线进行数字化存档是至关重要的,但随着研究的深入,我意识到,长城是中国人乃至全人类的宝贵文化遗产。”李哲说,“我们要用自己的专业知识,为长城补充建筑学的解释,同时要考古学的成果相结合,才能更全面地认识长城。”

基于建筑学专业的建筑构造知识,编辑处理、量化分析无人机低空摄影测量获得的实景三维模型,就可以将其应用于病害分析、场景复原等工作。

“实景三维模型本身就非常有价值,长城墙体坡度、尺寸测量、病害情况等全线统计都依赖于三维模型,因此用途非常广泛。”李哲举例说,比如把已知的近几年来长城塌损事件发生的位置统计出来,再结合三维模型就能发现塌损规律:都是在山体陡峭段到平缓段的转折点出现的塌损,这样就可以从现象规律揭示病害成因。

此外,还可以在实景三维模型的基础上,人工搭建出已经缺失的结构。很多木构空心敌楼都只剩下四面外墙,用人工建模就可以补齐内部的木梁柱结构,由内到外地还原出空心敌楼的全貌。人工建模的过程通过渲染,生成视频或者动画,让已经被岁月侵蚀的长城再次生机勃勃地“活”过来。

这些三维立体模型还可以通过3D打印技术制作出模型,把长城实景惟妙惟肖地“搬到”博物馆中。此次展览就展出了大量长城3D模型,配合讲解让观众一目了然。

李严指着唐代戍堡3D打印模型上的一个小孔对记者说:“这就是当年烧火做饭的烟道,博物馆中的实体模型完美复刻了文物保存现状。”

AI辅助梳理长城隐秘而伟大的“家族图谱”

长城的“秘密通道”从史书走入现实。历时4年多时间,跨越10省区,研究团队对明长城全线超九成的人工墙体,进行分辨率接近厘米级的连续拍摄,甄别出130多处暗门实物遗存并首次构建其“家族图谱”。

“长城不仅仅是‘一道墙’。”研究团队负责人、长城防御体系研究专家、天津大学建筑学院教授张玉坤介绍,长城防御体系包括镇城、路城、卫城、所城、堡城、驛传系统、烽燧、屯田系统、关隘关口、敌台、墙体等多个子系统。

李哲认为,长城测绘的一大核心意义就是向公众点明长城是一个体系,整体类似辐射状分布,古人将其形容为“龙翔凤蒸”。

之前受限于技术,长城庞大的“家族”一直未进行过系统性的梳理。

而长城全线实景三维数据库的建立,以及人工智能的辅助应用,为这项庞大的、系统性梳理工作提供了可能。

“200多万张照片,由人一张张去看、去找显然不现实,这时候人工智能就可以帮忙进行筛选。”团队中负责数据库编程搭建和人工智

能图像筛选的博士生张梦迪举例,比如团队想梳理空心敌楼,就找照片训练计算机了解空心敌楼的各种特征,得到成熟的模型算法后,机器就能迅速在海量照片中识别所有的空心敌楼。对于以空心敌楼,目前AI识别准确率已经达到90%。

在长城众多“家族图谱”中,暗门是存在于长城中的一套“隐秘而伟大”的系统。

李哲指着墙上的一幅清朝乾隆年间绘制的地图复制品对科技日报记者说,这幅地图是李严在国外访学时发现的,上面的长城清晰可见,而且还标有暗门等军事设施。暗门是一种矮小门洞,会根据地势、军事需求开设在长城隐蔽段落,朝向关外的秘密出入口。

“暗门藏着长城的秘密,更藏着古人的智慧。”李哲说,以往鲜见此类研究。

人工筛查结合AI搜索,研究人员发现了130多处暗门实物遗存,他们不仅对图片进行了分析,还实地考察了其中一部分,发现每一处暗门都与当地地形高度契合,且其构造根据需求各不相同。“不得不佩服古人的设计,暗门的设置十分灵活,比如转折型暗门,这样可以保证在马蹄这样的场景中,以暗门阻挡马匹,保护另一侧的人员不会受到马匹冲击。”李哲说。

在发现的所有暗门中,最让团队激动的发现是突门。

“更于兵出入便处潜凿城为门,外存尺余勿透,以备出兵袭击。”早在春秋战国时期,《墨子·备突》篇中就对突门进行了专门的著述。唐、宋、明、清学者均对突门有过记述,但此前一直未发现对应的实物证据。

“突门是用来实施突袭战术而设置的,清晚期著名学者魏源曾用‘藏于九地之下为暗,动于九天之上为突’来描写突门。”张玉坤解释,就是在暗道外面砌上一批砖,起到伪装作用,突袭时士兵击碎这层薄砖就可破墙而出,打敌军一个措手不及。

通过照片,团队成员发现了一处城墙上被击破后的破洞状遗存,破洞呈参差不齐的状态,而不是普通暗门预先设计、建造好的规则构造。“我们当时也不确定这是突门还是破损,实地探查后,我们采集了洞口内外侧的实景图照片,三维立体建模后,就把内外侧统一到一个模型中,最终确定这就是突门。”李哲感慨道,突门的发现以及暗门家族的梳理,离不开“长城全线实景三维数据库”。

截至目前,团队结合古代舆图已确认共计不少于220处暗门,并发现130多处实物遗存,发现了明代官方史料中“夫祖制,边墙下多留暗门”的明确记载,从而以实物和文献双证证明了关口之下存在暗门这第三层级通关设施。

目前团队正在对长城防御体系的堡寨城池、烽传线路、驛传线路、贸易设施、边缘墙体等各子系统进行全面梳理。

延伸阅读

两辆小车让长城测绘更“称手”

2022年暑假,天津大学建筑学院研究员李哲及其同事带领学生自天津出发,途经河北、山西、陕西、宁夏,最终至新疆进行了长达31天的长城补充拍摄,总行程达1.4万公里。

“我们熟知的八达岭、居庸关或者金山岭等知名景区,只不过是长城全线的千分之一,长城急需挖掘整理保护的部分都在崇山峻岭中或隐藏在不为人知的地方。”李哲说,这些地方交通条件都很差,不论是西部戈壁、荒原、沙漠、丘陵、黄土沟壑,或者是东部的山地,路都非常难走。而且无人机并不能独立完成长城全线的拍摄,提高可达性也非常重要。

李哲指着展厅里两辆不起眼的小车说,现场勘测全靠这两个“宝贝”了,一个是“单兵坦克”,另一个是四轮全地形车(ATV),也叫沙滩车。

华北地区的太行山和燕山地势陡峭,林间小路都是农民为上山采栗子、摘核桃、打枣子开辟的,一般只有1米宽,普通越野车根本上不去,摩托车冬季通行又太危险。“单兵坦克”是履带设计,因此在坡窄路上山更安全,可以带着各种勘测器材和人员爬上30度的陡坡。

在黄土高原或沙漠地带,小ATV就如同马儿一样,几乎是马能过的地方,它都能通行。“如果没有ATV,稍微下点雨,黄土路面就变得异常泥泞,普通越野车根本无法通过。在西部,绕道而行很可能需要多开几十公里,效率一下儿就降下来了。”李哲感慨地说,“没有这两个工具,很难在短时间内完成几千里长城的测绘。”

尽管有了“称手”的工具,但是在艰苦的环境中进行长城测绘,依然像探险。

“当时是在山西测绘,深山中恰逢大雨,山水已汇聚成洪水,在齐胸深的水中,我和学生跳下去,将进水熄火的车从水里推出来,此时沙滩车再也无法冲过洪水,我们只得弃车前行。野外夜间寒冷无法露宿,没有退路可言,在十几度气温下,渡河后我们浑身冰冷仍接着往外走。等走出山,看见大路车灯的时候,只觉得劫后余生,在那一刻,早已热泪盈眶。”李哲回忆道。

在荒郊野岭,手机没有信号,与狼群狭路相逢的经历,更是让团队成员记忆深刻。

无问西东,团队一次又一次地踏上长城测绘之路。目前长城全线实景三维图像采集工程已经完成九成明长城人工墙体段,有望今年底完成明长城的全线测绘。

本版图片由受访者提供



无人机低空摄影测量获得的河北金山岭长城实景三维模型。