

夏文杰, 张玉明. 基于三维扫描的火灾后建筑空间结构虚拟重建系统[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 113-117. [XIA Wenjie and ZHANG Yuming. Virtual reconstruction system of building space structure after fire based on 3D scanning[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 113-117. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.021.]

基于三维扫描的火灾后建筑空间结构虚拟重建系统*

夏文杰¹, 张玉明²

(1. 济南工程职业技术学院, 山东 济南 250000; 2. 山东建筑大学, 山东 济南 250101)

摘要:传统系统在进行火灾后损毁建筑空间结构虚拟重建时, 未进行虚拟受力模拟, 重建效果不佳, 并行处理效果差。为此, 该文结合三维扫描技术, 构建灾后建筑空间的草图, 设计出一个性能更佳的系统完成火灾后建筑空间结构虚拟重建。三维激光扫描仪直接连接计算机实现对灾后损毁建筑数据采集, 提高数据准确性; 对系统软件功能架构进行设计, 通过单片测图功能进行灾后建筑空间草图生成, 根据坐标转换对灾后建筑的三维模型重建, 实现火灾后建筑空间结构虚拟重建系统的设计。为验证系统性能, 设计对比实验。实验结果表明, 所设计的系统建筑重建时间短, 运行速率快, 仅为传统系统处理时间的十四分之一, 具有一定的应用价值。

关键词:火灾; 三维扫描; 空间结构; 灾后建筑; 虚拟重建

中图分类号: O343.2; X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)01-0113-05
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.021

多地火灾频发, 建筑物遭到损毁, 需要进行建筑重建。随着信息时代的来临, 三维建筑概念逐渐成为了数字城市研究的热点, 人们的认识活动也逐渐从熟悉的向陌生的空间不断拓展, 在发展和转变过程中, 完成建筑数字化进程的关键即解决建筑物重建问题^[1]。建筑空间的重建需要花费大量的人力与物力, 为了节省成本花销借助计算机技术实现建筑空间结构的虚拟重建。由于建筑空间的空间组成要素较多, 在重建过程中需要采集建筑空间内部的相关结构数据, 常用的数据采集需要借助 GPS 定位系统, 然而这种采集方法无法采集到精细的空间内部数据^[2-3]。经过长时间的研究发现, 激光三维扫描可以精确的采集到三维位置的定位数据, 实现三维环境的重建。三维激光扫描具有激光亮度高、携带能量大的特点, 采用该技术对物体空间外形和结构及色彩进行扫描, 得以获取物体表面的空间坐标^[4]。其工作原理是通过添加多个自由度的方法将点激光测量映射到整个三维空间, 从而获取三维的激光点云。将其应用在建筑空间结构虚拟重建当中, 可以有效地解决现有重建系统重建速度慢、与实际结构不符等问题。

为此, 本文引入了三维扫描技术, 设计火灾后建筑空间结构虚拟重建系统, 提升建筑并行重建时间, 提高效率。

1 系统硬件设计

在建筑空间结构虚拟重建系统中, 由于使用了激光三维扫描技术, 因此整个系统的硬件设计分为两个部分; 一个是三维激光扫描仪器, 另一个则是能够支撑系统运行的运行设备。

1.1 激光扫描仪

激光扫描仪是一种利用光学原理运作的距离传感器, 如图1所示。



图1 激光扫描仪

由于激光在测量过程中, 不会对被测物体本身产生影响, 因此被广泛的应用在危险区域以及测量难度大的建筑当中^[5-7]。激光扫描仪的扫描方式分为单线扫描、光栅式扫描以及全角度扫描三

* 收稿日期: 2019-07-25 修回日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(51308326)

第一作者简介: 夏文杰(1974-), 女, 山东寿光人, 副教授, 研究方向为建筑工程、结构工程. E-mail: Lzongcai@163.com

种。其内部含有激光光源、扫描器、光感检测器等零件,三维激光扫描仪的相关性能参数设置如表1所示。

表1 三维激光扫描仪参数设置表

参数	数值
电源电压/V	24
持续工作时间/h	6
单次测量周期/s	45
激光波/nm	1020
激光安全等级	2
有效测量距离/m	35
角分辨率/(°)	0.25
测量误差/mm	1
垂直测量最大角度/(°)	270
水平测量最大角度/(°)	360
重量/kg	2.31

在测量前,先对各个参数进行校正和校准。扫描仪的动力驱动装置选用步进电机,核心处理器的规格为高速处理芯片2.0。

1.2 系统运行设备

建筑空间结构虚拟重建系统的运行主要借助于计算机。系统运行的计算机需要满足的条件有:64位操作系统,处理器为4.20 GHz及以上版本,内存空间在8 GB以上。激光扫描仪会向系统中传送大量的三维数据信息,因此需要外设一个存储器,大小在32 GB以上。

2 系统软件设计

建筑空间结构虚拟重建系统分为功能模块和性能模块,功能模块实现单片测图以及三维模型重建,而性能模块分为用户界面和系统维护,整个系统的模块分布情况如图2所示。

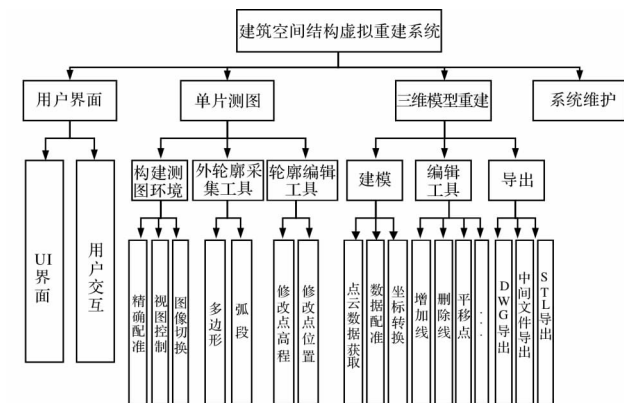


图2 系统软件功能架构图

根据激光三维扫描仪的数据采集特点,对建筑空间结构虚拟重建采用建筑物轮廓采集、内部结构重建、模型编辑以及模型导出4个层次。

在系统UI界面上设置导航栏,导航栏分别为首页、单片测图、建筑三维重建以及交互窗口等。

在用户的交互窗口可以实现用户与系统以及用户与用户之间的互动。

2.1 单片测图

单片测图是建筑空间结构虚拟重建系统中的一个功能选项,也是最终实现空间结构重构的一个关键步骤。要实现整个建筑空间的重构,需要将每一个平面元素单独构建起来,然后按照空间结构组合在一起。而单片测图就是将每一个平面元素构建起来^[8]。使用激光扫描仪器或者普通的图像记录设备将平面的建筑数据记录下来,直接输入到系统当中即可。而在单片测图模块中,设立编辑工具来实现部分结构的调整。由此可以向用户提供交互的编辑环境。在此模块中构建单片测图环境实质是利用空间加密成果,设立初始值加上同名特征匹配解算的外方位元素,构建透视投影模型^[9-10],结合点云搭建单片测图环境。

2.2 三维模型重建

三维虚拟模型的重建是在多元数据融合的模式下,采集建筑物的轮廓,融合点云和相关影像。建筑内部部分结构的重建需要采用法线分割方法检测屋顶面片和屋顶结构线^[11],再利用算法进行具体的重建操作。在此模块中也可以编辑一些对重建结果的特定要求,对自动生成的结果提供编辑工具进行局部修改。将最后的重建结果通过导出层支持模型以多种三维格式文件渲染并导出。

2.2.1 三维激光扫描获取数据

使用激光扫描设备按照设定的参数值进行运作,而获取数据的最终结果是将读取、识别完成的数据存储到系统数据库中,因此获取数据的流程如图3所示。

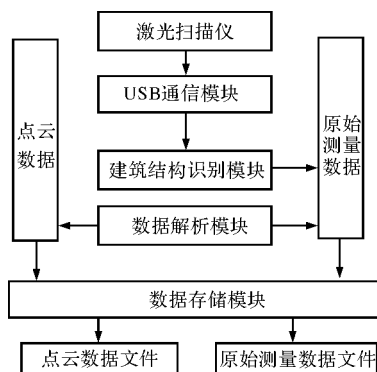


图3 获取数据流程图

将扫描设备放置在待测建筑前,开启激光发射装置,软件通过USB通信模块接收激光雷达发送的点云数据,返回的光信号经电子信号处理后,即可开始识别^[12]。将建筑空间内部的结构元素分为墙体、底板、天花板等元素,因此扫描设备在扫描时,除了需要记录扫描到的数据信息,也需要对检测物体的属性进行识别。接着借助扫描仪器进行空间结构的数据采集,主要针对测距和测角两个方面。以三维激光扫描仪作为核心单位,将激光发射到待测目标的表面,根据测距原理结合建筑空间结构的实际需求,选用相位测距法作为距离数据的测量方法。向目标建筑连续发射激

光束, 激光接收设备接收反射回波^[13]。通过往返两次激光束的相位差来计算激光信号往返时间, 进而测量目标的距离。假设角频率为 ω , 待测距离为 L , 往返一次的相位延迟用 ϕ 来表示, 因此往返时间的计算为

$$t = \phi / \omega. \quad (1)$$

由此待测距离 L 为

$$L = \frac{ct}{2} = \frac{c\phi}{2\omega} = \frac{c(N\pi + \Delta\phi)}{4\pi f}. \quad (2)$$

式中: f 表示的是完成调制之后的信号频率, N 为测线所包含调制半波长个数, $\Delta\phi$ 为信号往返测线一次产生相位延迟不足的剩余部分。在给定调制和标准大气条件下, $\frac{c}{4\pi f}$ 为常数。接着通过精密计算获得精确测角 θ_b 结果, 具体计算方法为

$$\theta_b = \frac{2\pi}{N_r mb}. \quad (3)$$

式中: N_r 为电机的转子齿数, m 表示的是电机相数, b 为各种连续绕组的线路状态数。由此便可通过精密时钟控制编码器同步进行激光脉冲测量, 获得每个激光脉冲横纵两个方向上的扫描角度值。对各个建筑空间结构的重建参数值进行存储, 完成原始测量数据的存储, 经处理后的数据存储。用 L 表示距离, θ_b 表示方位角, φ 表示俯仰角, G 表示灰度, 则存储的格式为 $(L, \theta_b, \varphi, G)$, 按指定的格式要求生成存储数据文件。

2.2.2 数据配准

将用激光扫描仪获取到的数据信息进行数据配准, 首先设置像素的标准格式, 设置的目的是避免在数据输出时, 程序渲染失败的问题。Windows 系统提供了一种结构体对像素格式进行描述。接着对图像数据进行平面分割, 保证数据配准的准确性。选用点云区域增长分割方法, 在分割之前规定约束区域生长过程的约束条件, 之后才能够对分割点中的每一个像素点进行特征向量估计操作^[14]。在分割区域中使用随机选择或者 Hough 变换的方法选取种子点。在此基础之上, 判断种子点的邻域点是否具有与种子点具有相似的特征测度, 相似则标识为同区域, 否则从当中删除并将下一个点作为新的区域增长种子点。若其邻域中查找不到新的种子点则完成区域增长过程, 在此过程中所有被标识为相似点的划分为一类。最后即可进行区域内的两两配准, 结合特征描述点在两个数据集中的数据, 估算两点之间的对应关系, 利用剩余的正确对应关系估算刚体变换, 完成配准。

2.2.3 坐标转换

三维坐标的转换按照功能分为两种, 一种是将激光扫描数据转换成为三维坐标的形式, 另一种就是实现编辑工具的功能。激光扫描仪采集的数据格式为 $(L, \theta_b, \varphi, G)$, 假设扫描仪的扫描起点坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 输入的目标数据为 $(L_0, \theta_{b0}, \varphi_0, G_0)$, 那么通过坐标转换算法即可求出目标点的坐标 (x, y, z) 。其中横坐标 x 的计算为

$$x = x_0 + L_0 \cos \theta_{b0}. \quad (4)$$

同理 y 坐标与 z 坐标的求解方法为

$$y = y_0 + L_0 \sin \theta_{b0}; \quad (5)$$

$$z = z_0 + L_0 \sin \varphi_0. \quad (6)$$

图像当中的每一个像素点的灰度值均为 G_0 。将目标区域中的每一个像素点按照上述方法进行坐标转换, 即可得出目标图像的矩阵描述形式。

编辑工具当中的编辑功能包括: 平移、旋转和缩放, 这几种变换方式都会改变坐标数据, 因此需要加以计算。以旋转操作为例, 原始的坐标

表示为 $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$, 绕 x 轴旋转, 则可表示为:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R_x \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (7)$$

式中: R_x 表示的是旋转矩阵, 其表达式为:

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (8)$$

式中: α 为旋转角度, 将其可分解式为:

$$\begin{cases} X' = X; \\ Y' = Y \cos \alpha - Z \sin \alpha; \\ Z' = Y \sin \alpha + Z \cos \alpha. \end{cases} \quad (9)$$

同理可以实现沿 y 轴以及 z 轴的坐标转换。

2.2.4 三维渲染

一般大型的建筑物的内部空间结构都较为复杂, 所以在进行建模渲染时, 需要先对其内部结构进行构建, 其内部结构为规则的建筑物构件和不规则的建筑物构件。在必要的情况下, 需要保留现状或者较难建模的建筑物构件, 通过三角网模型保留建筑物原始面貌^[15]。依照投影原理把建筑物的每一个构件放到同一个文件项目里, 进行整体测量控制, 由于每一个组成部分的参数都在整体的坐标系中, 所以按照顺序拼接在一起就可以形成一个完整的建筑内部虚拟空间。对于各个构件之间存在的大大小的缝隙和交叉部分需要加以修正, 最终形成一个完整的建筑物实体三维模型。在进行三维渲染之前对渲染参数进行设置, 由于所需的重建结果以三维形式输出, 因此选择透视投影为渲染的投影方式。灰度值的设置参照 R 、 G 、 B 的取值, 其中 R 的取值为:

$$R = \begin{cases} 0, & 0 \leq f \leq 63; \\ 0, & 64 \leq f \leq 127; \\ 4f - 511, & 128 \leq f \leq 191; \\ 255, & 192 \leq f \leq 255. \end{cases} \quad (10)$$

同理 G 与 B 的取值为:

$$G = \begin{cases} 4f, & 0 \leq f \leq 63; \\ 255, & 64 \leq f \leq 127; \\ 255, & 128 \leq f \leq 191; \\ 1023 - 4f, & 192 \leq f \leq 255. \end{cases} \quad (11)$$

$$B = \begin{cases} 255, & 0 \leq f \leq 63; \\ 511 - 4f, & 64 \leq f \leq 127; \\ 0, & 128 \leq f \leq 191; \\ 0, & 192 \leq f \leq 255. \end{cases} \quad (12)$$

式中: f 表示的是频率。

三维渲染除需要设置视点位置、视口长宽比等, 除此之外还需要对渲染环境的光照、阴影、

材质、纹理等条件进行具体设置。在渲染线程中,反复调用渲染场景函数,为了使场景更加真实也可以加上网格线进行渲染。最后将渲染完成的模型以 DWG、OBJ、STL 通用三维文件格式,以及 TerraScan 软件识别的中间文件格式导出。

2.3 灾后损毁建筑三维草图构建

系统维护模块是用来保证系统中的功能可以正常运行,维护的部分包括注册表的维护、操作系统维护以及病毒的防范和处理等。通过系统维护来提高系统的运行效率,节省建筑空间结构虚拟重建时间。

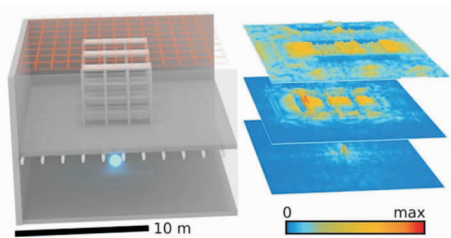


图4 建筑空间结构三维受力分析

将火灾后建筑物的长、宽、高、层数、材料等相关参数输入系统,获得重建建筑受力图如图4所示,分析上图可知,建筑物二层、三层受力更加集中。在此基础上进行灾后建筑三维草图构建,如图5所示。



图5 建筑三维草图

建筑空间结构草图已经大体上构画出建筑的空间结构,建筑的门、窗及构体等都十分清楚,实现了建筑空间结构三维可视化。

3 系统实现

在图5的基础上调用三维扫描仪采集到的数据,在系统界面中,直接点击工具栏的按钮便可直接生成重建结果(图6)。分析图6可知,本文系统能够较好的对火灾损毁建筑进行重建,可知给出较为清晰的建筑空间结构,有效的实现了空间布局的可视化,同时能够在工具栏中可以进行重建编辑,对部分空间结构进行修改,以获得理想的重建结果,为之后的火灾后的建筑重建提供参考。

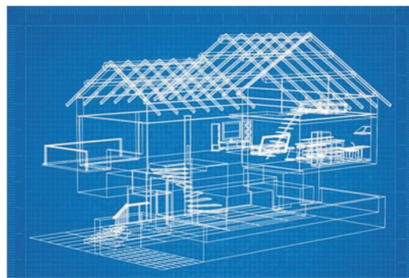


图6 系统实现结果

4 系统测试实验

在建筑空间结构虚拟重建系统能够正常实现内部功能的情况下,对系统的性能进行测试,主要针对的是虚拟重建的运行时间。设立传统重建系统(TRS)和基于GPS的重建系统(GRS)作为实验的两个对照组,而设计完成的基于激光三维扫描的建筑空间结构虚拟重建系统(LRS)为实验组。选取多个建筑物作为实验的重建对象,以该建筑物的内部建筑设计图作为重建标准。实验中的重建系统除运行过程外,其他参数均保持一致。从系统硬件中启动采集重建数据任务为实验的起始时间,重建结果渲染完成并按照规定三维格式导出完成时间即为实验截止时间。三个重建系统的实验统计结果如表2所示。

表2 实验统计结果

重建建筑数量/个	TRS 系统	GRS 系统	LRS 系统
1	25 min	12 min	3 min
5	2.5 h	1 h	12 min
10	4.2 h	2.7 h	45 min
100	56 h	21 h	4 h

从表2可以看出,随着任务数量的增加,基于激光三维扫描的建筑空间结构虚拟重建系统的运行速度逐渐增加,从3 min/个提升到了2.4 min/个;而传统的重建系统运行第一个任务的时间是LRS系统的8.3倍,任务数量增加运行的速度逐渐减慢,最终LRS系统的平均运行速度达到传统重建系统的14倍。GRS系统由于需要与卫星系统相连接,数据传输消耗的时间较长,整个系统运行消耗的时间也明显高于LRS系统。为了更加直观的分析这三种系统对火灾损毁建筑的虚拟重建效率,将表2中数据用图7表示。

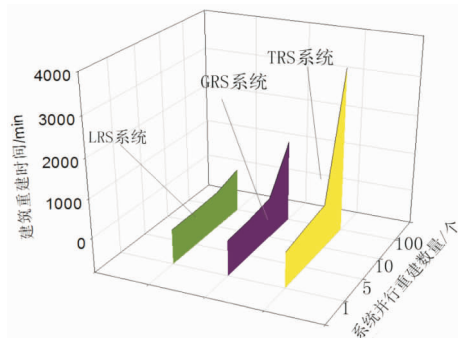


图7 不同方法下系统重建时间对比

分析图 7 可知, 建筑并行重建的数量越多, 重建的时间越长, 当并行重建的数量达到 100 个时, 三种系统的处理时间差异已经十分明显, 此时 GRS 系统的重建时间为 21 h, 也就是 1 260 min; TRS 系统的处理时间为 56 h, 即 3 360 min, 是 GRS 系统处理时间的 1/2; 而本文系统火灾后建筑空间结构虚拟重建时间仅为 4 h, 也就是 240 min, 是 TRS 系统重建时间的 1/5, 是 GRS 系统的 1/14, 具有更高的处理效率, 说明本文设计的火灾后建筑空间结构虚拟重建系统并行处理效率高, 更适合火灾后的建筑重建。

5 结束语

火灾会损毁建筑物, 需要建筑重建, 为了提高建筑施工效率, 需要对损毁建筑进行空间结构虚拟重建, 引入三维扫描技术, 为此设计虚拟重建系统, 大大的降低了重建工作的难度。通过单片测图功能进行灾后建筑空间草图生成, 火灾后建筑空间结构虚拟重建系统并行处理效率高, 有效提升损毁建筑的重建时间。

但是这种重建方法依然存在原始数据量大、数据冗余等问题, 相信在不久的将来, 三维激光技术会在建筑空间结构重构领域中发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 李雪. 基于三维扫描点云数据的古建筑数字化保护技术[J]. 美与时代(城市版), 2018(1): 34-35.
- [2] 张文. 基于模糊数学的震后建筑火灾危险性评估模型研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(6): 1372-1377.
- [3] 闵笑峰. 浅析火灾后建筑结构鉴定检测与修复加固[J]. 江西建材, 2017(24): 305-306.
- [4] 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1509-1516.
- [5] Campi M, Luggo A D, Scandurra S. 3D Modeling for the knowledge of Architectural Heritage and virtual reconstruction of its historical memory[J]. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, XLII-2/W3: 133-139.
- [6] 史俊伟, 王树祯, 陈章良, 等. FRAME 在高层建筑火灾风险评估中的应用[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(5): 699-703.
- [7] 李昌华, 张晗玥, 周方晓. 建筑信息模型的 Web 端重建与三维交互方法研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2017, 9(2): 47-51.
- [8] 王丹婷, 蒋友燊. 古建筑三维虚拟建模与虚实交互软件实现[J]. 计算机应用, 2017, 37(2): 186-189.
- [9] 霍林生, 张耀文, 李宏男. 图像三维重建法在震损建筑实体建模中的应用研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(2): 115-120.
- [10] Demetrescu E, Fanini, Bruno. A white-box framework to oversee archaeological virtual reconstructions in space and time: Methods and tools[J]. Journal of Archaeological Science Reports, 2017, 14(14): 500-514.
- [11] Alonso A, Suárez, Rafael, Sendra, Juan J. Virtual reconstruction of indoor acoustics in cathedrals: The case of the Cathedral of Granada[J]. Building Simulation, 2017, 10(4): 1-16.
- [12] 黄佳彪, 熊岳山, 何鸿君. 基于无人机航拍序列的建筑三维模型重建[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(5): 6-10.
- [13] Sender M, Planells, A, Perelló, R, et al. Virtual acoustic reconstruction of a lost church: application to an Order of Saint Jerome monastery in Alzira, Spain[J]. Journal of Building Performance Simulation, 2017(1): 1-22.
- [14] 邓育林, 候汝军. 雅安“4.20”地震后高颐阙的数字化重建保护实践研究[J]. 创意与设计, 2018, 56(3): 21-26.
- [15] 索俊锋, 刘勇, 蒋志勇, 等. 基于三维激光扫描点云数据的古建筑建模[J]. 测绘科学, 2017, 42(3): 179-185.

Virtual Reconstruction System of Building Space Structure after Fire Based on 3D Scanning

XIA Wenjie¹ and ZHANG Yuming²

(1. Jinan Engineering Polytechnic, Jinan 25000, China; 2. Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: When the traditional system destroys the virtual reconstruction of the building space structure after the fire, the virtual force simulation is not performed, the reconstruction effect is not good, and the parallel processing effect is poor. To this end, this paper combines three-dimensional scanning technology to construct a sketch of the post-disaster building space, and design a better performance system to complete the virtual reconstruction of the building space structure after the fire. The 3D laser scanner is directly connected to the computer to realize the collection of damaged building data after the disaster, and the data is improved. Design the system software functional architecture, generate the sketch of the post-disaster building space through the single-slice mapping function, reconstruct the 3D model of the post-disaster building according to the coordinate transformation, and realize the design of the virtual reconstruction system of the building space structure after the fire. To verify system performance, design a comparative experiment. The experimental results show that the designed system building reconstruction time is short, and the running rate block is only one-fourth of the processing time of the traditional system, which has certain application value.

Key words: fire; 3D scanning; space structure; post-disaster architecture; virtual reconstruction