

基于空间图示和 CityEngine 的堡寨聚落虚拟重建研究

——以关中地区为例

王绚¹, 范伟², 侯鑫³, 王艳⁴

摘要: 古代传统居民在战乱中广泛采取营建堡寨的方式以求自保, 堡寨是一种防御性聚落形式, 其作为传统居民生活方式的一种物质载体, 蕴含了丰富的历史社会文化价值。但是在自然和社会因素影响下, 堡寨聚落遭受着严重的破坏, 通过虚拟重建的方式能够完成堡寨聚落的数字建档和储存, 并借助可视化媒介向大众展示, 以促进文化遗产的价值传播。立足于关中地区堡寨聚落批量化生成语境, 基于空间图示和 CityEngine 提出一种“模式图示—数字建模—模拟演示”的堡寨聚落虚拟重建 workflow, 一方面试图深化对堡寨聚落的空间认知; 另外探索了一种大规模建筑遗产复原方法, 以期在传统堡寨聚落数字文旅的构建提供支持。

关键词: 堡寨聚落; 空间图示; CityEngine; 虚拟重建; 关中地区

Keywords: Fort-type Settlements; Spatial Diagram; CityEngine; Virtual Reconstruction; Guanzhong Area

资助项目情况: 国家自然科学基金项目 (51778400); 国家自然科学基金项目 (52078324)

引言

关中地区由于其独特的地理位置和军事意义, 成为中国传统历史上持续遭受战争侵扰的地区之一, 形成了众多具有防御功能的堡寨聚落。这些堡寨聚落不仅是当地居民抵御外来入侵的重要屏障, 也是关中地区独特的历史文化象征。随着时间的推移, 许多堡寨聚落逐渐消失或被遗弃, 保护这些历史遗产成为一个亟待解决的问题。近年来, 随着虚拟现实技术的发展和三维建模工具的广泛应用, 历史遗址的虚拟重建和数字化建档成为了有效的保护和研究手段, 其能够实现建筑遗产的虚拟保存、重建和演示, 为建筑遗产的保护提供了一种新视角。郭黛姮团队结合数字技术通过基础研究、复原设计、场景制作和维护更新四个步骤实现了圆明园的虚拟重建^[1]。张玉坤团队基于地理信息技术 (GIS), 构建了明长城文化遗产数据库, 分类分级显示长城体系的空间分布, 实现从宏观到微观的多层次虚拟演示^[2]。狄雅静基于 BIM 技术虚拟重建了柬埔寨茶胶寺南外门的建筑信息模型, 以期实现建筑遗产的全生命周期管理^[3]。唐芄通过建立“数据收集—特征提取—生成设计”的数字链完成宜兴丁蜀古南街历史风貌的虚拟重构^[4]。目前研究多集中在对历史遗址个体的真实性原貌进行还原, 而对于批量化复原某一地域内具有较为相似风貌特征的传统聚落研究较少。通过空间图示方法分析和解构关中地区堡寨聚落的空间模式, 立足于堡寨聚落批

¹ 王绚, 天津大学建筑学院, 副教授

² 范伟 (✉), 天津大学建筑学院, 博士研究生, 719939870@qq.com

³ 侯鑫, 天津大学建筑学院, 副教授

⁴ 王艳, 天津大学建筑学院, 博士研究生

化生成语境，提出一种“模式图示—数字建模—模拟演示”的堡寨聚落虚拟重建 workflow，试图对未来的文化遗产保护和展示提供参考。

1 堡寨聚落虚拟重建 workflow

《伦敦宪章》中提到两种不同的历史建筑复原范畴，一种是基于实据的复原；一种是基于假设的复原^[5]。其中“假设复原”概念是基于有限资料与逻辑推导的一种推测性研究^[6]。目前堡寨聚落的营建资料匮乏，通过对当前保存条件较好的堡寨聚落进行空间模式研究，以挖掘堡寨聚落的地理选址和空间营建特征，是进行基于实据复原或假设复原的第一步。之后，使用 CityEngine 等建模软件完成建模。最后，将堡寨聚落模型导入到 Twinmotion 中完成场景营造。具体步骤如下：

(1) 步骤 1：模式图示

开展聚落空间模式研究，是从聚落空间的共性特征中发掘空间规律或组织原则，采用空间图示方法对堡寨聚落空间模式进行解译，深化对黄河流域堡寨聚落的空间认知。首先对关中地区堡寨聚落相关资料进行收集，一方面在 ArcGIS 中构建堡寨聚落地理信息数据库，为实现堡寨聚落地理分布与堡寨聚落虚拟重建模型相耦合搭建前端架构；另一方面整理归档堡寨聚落空间模式的图示和文字记载。之后，按照“边界—街巷—建筑—节点”四个层级完成堡寨聚落空间模式图示（图 1-1）。

(2) 步骤 2：数字建模

根据步骤 1 中完成的模式图示和数据分析结果，一方面可以进行堡寨聚落的实据复原，采用无人机倾斜摄影建模堡寨聚落现状场地，并导入到 Rhino 等 3D 造型软件中根据实际数据完成堡寨聚落单体或宅院单体的修复建模。另一方面，通过编写堡寨聚落生成规则，实现批量化规则建模。在 CityEngine 平台中进行“边界—街巷—建筑”三个层级的 CGA（Computer Generated Architecture）语法规则编写，将每个层级的模式图示按照树形结构转译为语法规则，规则中的所有参数均提炼于模式图示。之后，对不同尺寸的地块应用规则，完成堡寨聚落的批量化生成并导出（图 1-2）。

(3) 步骤 3：模拟演示

将导出的堡寨聚落模型导入到 Twinmotion 平台中完成材质的替换和渲染，并在其中完成“节点”层级的场景营造。之后完成三维模型封装并发布，模型可以使用多种 VR 设备进行演示，使用者可以体验堡寨聚落的不同视角，并实现与模型的交互来改变时段、天气等场景（图 1-3）。



图1 堡寨聚落虚拟重建 workflow (图片来源: 作者自绘)

2 关中地区堡寨聚落的虚拟重建

2.1 步骤一: 模式图示

关中地区位于陕西省中部, 堡寨聚落遗址在此约有 293 处 (图 2)。其地形以台塬和平原为主, 大多地区地势平坦无险可依, 因此堡寨形制多为矩形, 矩形堡寨可以在保证城墙坚固的前提下, 最大限度地利用土地, 使城墙长度最大化, 从而增加城墙的防御能力。此外, 矩形形状也更有利于掌握城内情况, 部署军事力量和管理城内人口。具有典型性的如合阳县高原寨、韩城市西塬村、蒲城县山西村、王曲镇北堡寨村 (图 3-1)。因此以矩形堡寨聚落空间形态为例, 根据以上典型关中地区堡寨聚落特征构建原型, 从边界、街巷、建筑、节点四个层面图示堡寨聚落空间结构模式 (图 3-2)。

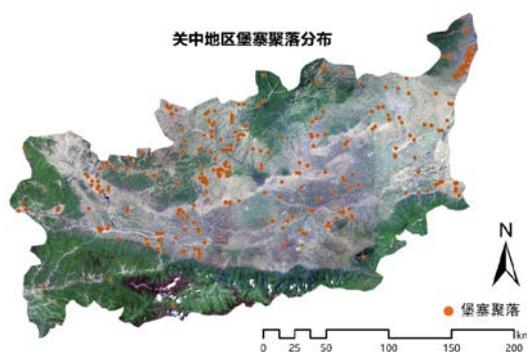


图2 关中地区堡寨聚落分布 (图片来源: 作者自绘)

(1) 边界

在边界层面, 堡寨的边界由线性防御结构构成, 如壕沟和城墙, 壕沟位于城墙外侧, 城墙以夯筑为主。通常是将壕沟中挖出的土筑墙, 例如《修筑堡寨章程》提到“于堡寨外相离一二丈地面跳挖壕沟, 挑起之土即以培筑, 墙垣距堡寨城边之地不论官民悉准挑挖”。即将所挖之土筑于境之内岸作垒, 垒即城墙。城墙上设雉堞, 也会有向外突起的敌台和角台。城门数量一至四个不等, 取决于防御要求、堡寨面积、地理环境等要素。在城墙内部, 设有斜坡蹬道称为马道, 通过其登上城墙, 马道通常位于交通要处 (图 3-3)。

(2) 街巷

在街巷层面, 多秉持“大街小巷”的形式, 由于关中地区堡寨聚落面积通常较小, 街巷布局横平竖直并不复杂, 街通常为一字型、十字型, 鱼骨型三种形式, 也起到了划分街坊的作用。为节约用地, 横向街道较多于竖向街道。巷的形式更为多样化, 主要表现为尽端型、丁字型、拐角型。三种形式的巷路均是由于城内并非整齐的网格地块布局, 大小形状不同的地块交织在一起导致难以形成全部十字正交的巷路结构, 且从防御功能上来看, 三种形式的巷路均能起到诱敌深入并借助围合的建筑包围歼灭敌人的作用 (图 3-4)。

(3) 建筑

宅院间普遍呈现规整的左右或上下邻接关系, 错动偏移的邻接关系较少。宅院单体多为独院式和纵向多进式, 其中独院式分为二合院、三合院、四合院, 纵向多进式大多为二进院或三进院^[7]。窄院和“房子半边盖”是关中宅院的主要特点, 窄院是由于关中宅院大多面宽窄、进深长, 面

宽和进深约为 1: 3, 这形成了狭长南北院落^[8]; “房子半边盖”指东西厦房采用坡向院子的单坡屋顶, 而厅房和门房仍为双坡屋顶形式^[9] (图 3-5)。公共建筑形式包括庙宇、祠堂、戏台等, 其中庙宇可位于城门上方、城门外侧、街巷尽头、街巷两侧等不同位置, 祠堂和戏台通常结合开敞的公共空间设置。此外, 有的堡寨内部还会建有一座或数座望楼, 借以登楼远望进行防备^[10]。

(4) 节点

堡寨聚落节点包括城门、广场、交通中心、涝池、哨门、古井等。城门周围通常会留有较大的集散场地, 且作为堡寨最重要的形象之一, 会进行一定的装饰, 例如在券龕上雕刻门名等, 也能够视觉上起到威慑敌人的作用。堡寨内的广场空地可作为休闲娱乐场地, 战时也可作为穷困居民的避难地点, 通常也会与祠堂、戏台等公共建筑结合。矩形堡寨的交通中心也是堡寨整体的中心, 是人流集中的区域, 也常常在中心街口设置有戏楼、望楼、古塔等标志物。涝池用于干旱地区汇集地表径流的雨水以作为生活用水。哨门常见分布于堡寨的街巷上, 在古代具有防御性质, 现在多表现出装饰作用 (图 3-6)。

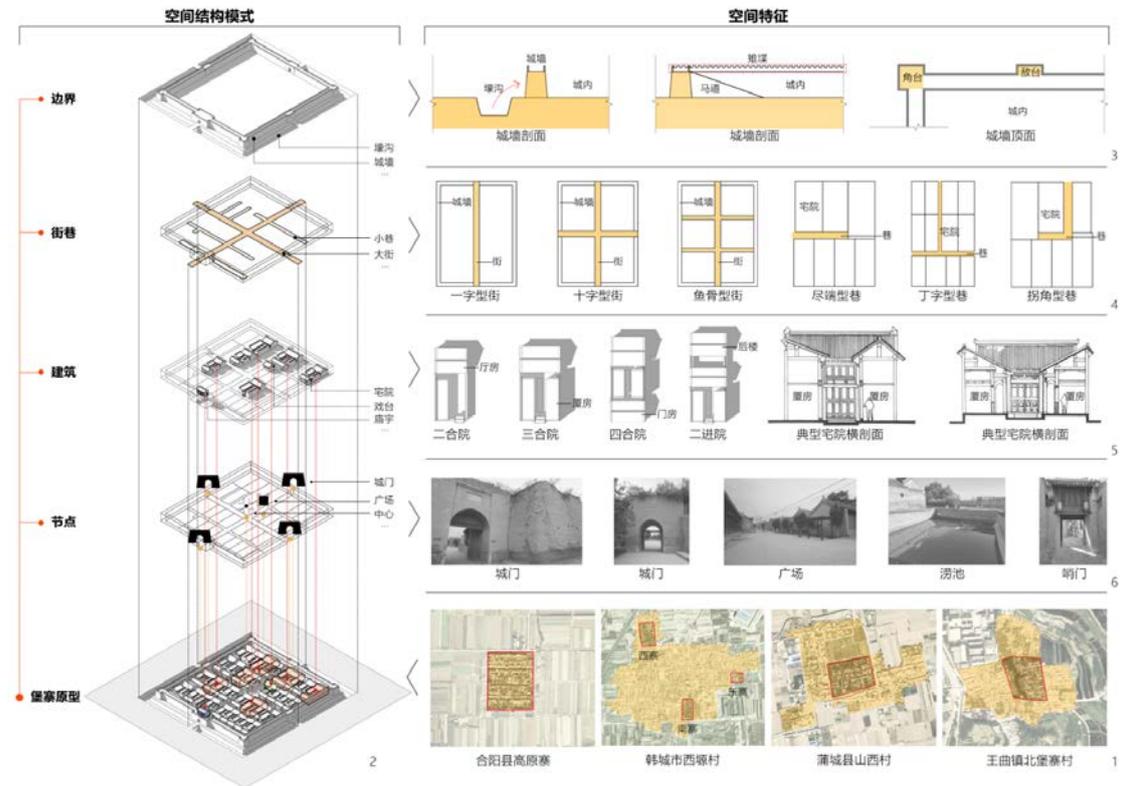


图 3 堡寨聚落的空间结构模式 (图片来源: 1-4 为作者自绘; 5 参考[7]张璧田, 刘振亚. 陕西民居[M]. 中国建筑工业出版社, 1993; 6 为作者自摄)

2.2 步骤二：数字建模

2.2.1 实据复原

以高原寨内某宅院修复为例, 通过无人机倾斜摄影建模方法建立高原寨三维模型, 将需要修复位置的模型网格进行删减优化。之后, 基于实据的布局、尺寸及样式建立原始宅院三维模型, 并参考高原寨内尚存的传统宅院特征选取和赋予模型材质。然后, 将宅院模型导入高原寨模型, 完成局部修复重建 (图 4)。



图4 高原寨某宅院修复重建（图片来源：作者自绘）

2.2.2 假设复原

模式图示中四个层级的堡寨聚落空间形态，为假设复原的语法规则提供了参考。模式图示将堡寨聚落进行拆解，一方面能够为语法规则提供基本的尺寸关系，另一方面厘清了堡寨聚落每个层级中构筑物的空间关系。例如，在边界层级中，模式图示确定了城门、角台、马道等空间在城墙墙体中的定位；在街巷层级中，模式图示确定了小巷和大街的连接位置，以及小巷的延伸方式等；在建筑层级，模式图示交代了建筑的基本形式及合院类型。

以模式图示为指导进行规则编写，并根据 CityEngine 中规则的树形结构（图 5）绘制了规则结构解译图示（图 6），规则是按照树形结构逻辑由初始形状——随机给定的一个矩形地块——开始编写，整个规则流程主要伴随着形状的挤出、划分、替换操作。每个层级的规则起始均有一个触发形状，该形状会触发后续的规则推理，由于触发形状具有独立性因此可以将每个层级拆解为独立的规则模块，便于规则的灵活应用和修改。

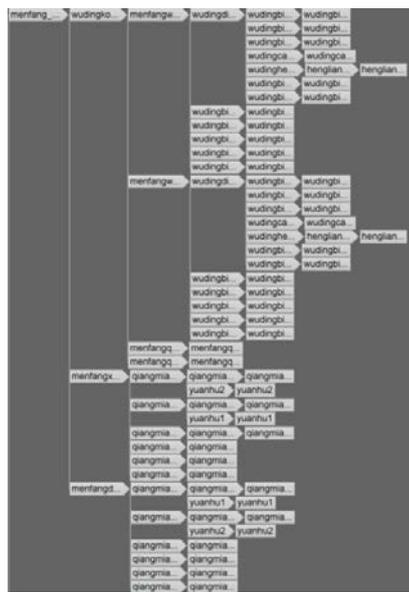


图5 CityEngine 中的部分规则结构示意（图片来源：作者自绘）

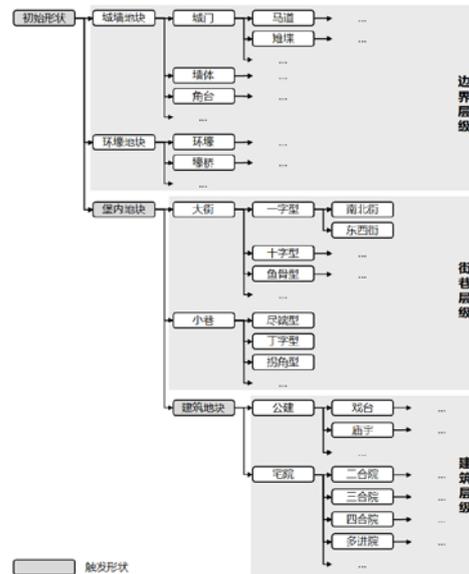


图6 规则结构解译图示（图片来源：作者自绘）

(1) 边界层级

首先根据城墙底部宽度和壕沟的顶部宽度划分地块，剩余作为堡内地块。其次，城墙地块按照城门、墙体、角台、敌台等要素的三维形状尺寸和位置划分地块并生成体量，同理生成壕沟体量。之后，完成各部分马道、雉堞的生成。此外，在敌台的规则编写时，考虑到较长的城墙敌台数量多于较短的城墙，因此设定了生成不同数量敌台的规则（图 7）。

(2) 街巷层级

基于边界层级划分后得到的堡内地块，根据街巷的尺寸和位置进行划分，并编写了多种不同形式街巷的生成规则（图 8）。

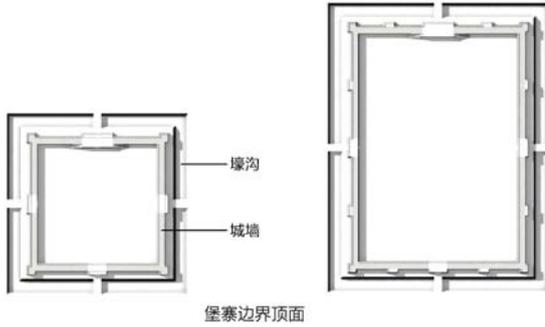


图 7 不同尺寸堡寨地块的边界生成（图片来源：作者自绘）

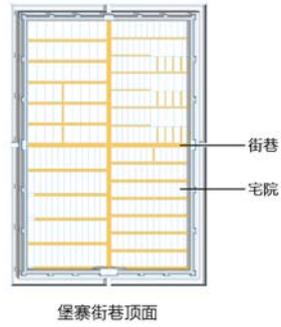


图 8 不同的街巷形式（图片来源：作者自绘）

（3）建筑层级

首先对建筑地块赋予不同的建筑类型标签，例如城中心的地块多赋予公建标签，其余地块赋予宅院标签。其次，以宅院为例，需要进一步赋予类型标签，定义规则识别地块的进深和面宽以匹配满足尺寸的合院类型。之后，按照合院类型、空间尺寸、空间位置划分和生成门房、厦房、窄院、厅房等空间体量，并且生成台基、围墙、踏步等要素。然后，根据屋顶类型生成屋顶，如硬山顶、单坡顶。最后，完成立面的生成，包括门、窗、线脚等（图 9）。

2.3 步骤三：模拟演示

在完成以上规则编写后，以三个不同尺寸的地块应用全部规则，生成的场景如图 10 所示。最后将模型导入 Twinmotion 平台中完成渲染和“节点”层级场景营造，并在 VR 中演示（图 11-13）。



图 9 规则生成的多种类型宅院（图片来源：作者自绘）

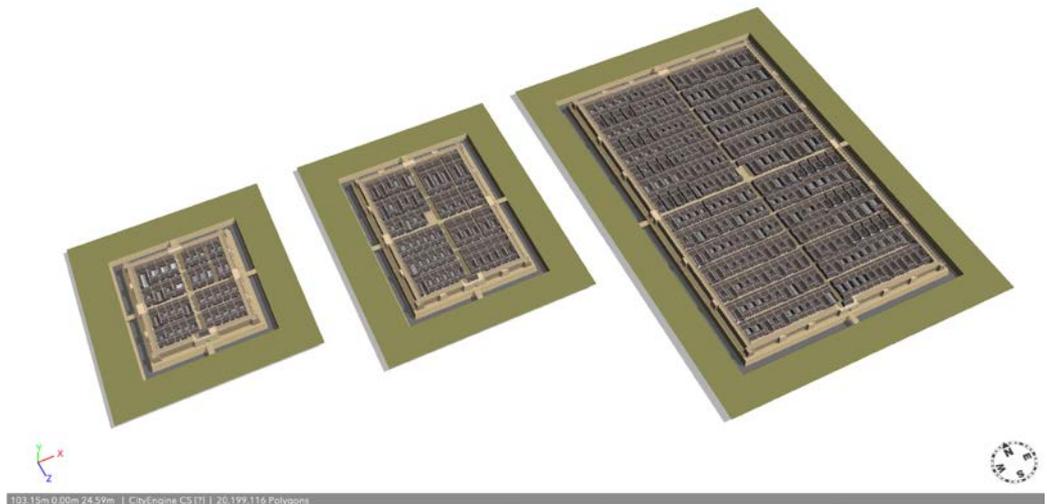


图 10 三个地块的堡寨聚落生成（图片来源：作者自绘）



图 11 材质渲染（图片来源：作者自绘）



图 12 城门节点场景营造（图片来源：作者自绘）



图 13 VR 演示（图片来源：作者自绘）

结语

通过利用空间图示与 CityEngine 相结合的方法,建立了堡寨聚落虚拟重建 workflow,完成了对关中地区堡寨聚落的虚拟重建研究。将空间图示分析过程作为 workflow 的第一步,不仅有助于揭示关中地区堡寨聚落独特的空间结构与形态布局特征,还能够促进建立关中地区堡寨聚落的历史文化图档,对提取堡寨聚落空间尺寸、形态等参数,以辅助规则编码过程具有重要的铺垫作用。数字建模过程完成了一套适用于关中地区堡寨聚落风格的生成式语法规则,能够对给定的地块进行批量化堡寨生成,证实了堡寨聚落虚拟重建 workflow 的可行性。当前研究仍有一定的薄弱环节,如历史资料的缺乏和模型细节的真实性问题。未来的研究将进一步加强历史数据的收集与整合,扩展语法规则模块,优化虚拟重建技术,提高重建模型的精度与细节表现。此外,将进一步探索虚拟重建在其他类型历史遗址中的应用,以推动历史文化遗产的数字化保护与传承。

参考文献

- [1]郭黛姮,张越.再现圆明园[J].中关村,2012(11):40-43.
- [2]张玉坤,徐凌玉,李严等.空间人文视角下明长城文化遗产数据库建设及应用[J].古建园林技术,2019(02):78-83+94.
- [3]狄雅静,吴葱.建筑遗产全生命周期管理与建筑信息模型研究——以柬埔寨茶胶寺南外门为例[J].新建筑,2013,149(04):109-112.
- [4]唐芑,王笑,华好.解码历史——宜兴丁蜀古南街历史风貌保护与更新中的数字技术与实践[J].建筑学报,2021(05):24-30.
- [5] DENARD H. The London Charter for the computer based visualisation of cultural heritage [EB/OL]. (2009-02-01) [2023-03-02]. <https://www.londoncharter.org/>.
- [6]王贵祥.隋大兴禅定寺高层木塔形式探[J].建筑史,2013(01):43-73.
- [7]张璧田,刘振亚.陕西民居[M].中国建筑工业出版社,1993.
- [8]周若祁.韩城村寨与党家村民居[M].陕西科学技术出版社,1999.
- [9]李滨,颜炳亮.从文化传播视角看晋系乡土建筑的区域关联[J].建筑遗产,2021(02):12-21.
- [10]张驭寰.中国城池史[M].中国友谊出版公司,2015.