

# 面向建筑运维的 BIM 模型功能空间识别

林佳瑞, 张建平

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**【摘要】** 建筑项目空间数据对运营维护期节能、逃生、导航、维护维修等应用具有重要价值。但当前 BIM 模型仍然存在着空间数据不完善、拓扑逻辑信息少的问题。本研究面向 BIM 模型空间数据提取、完善, 提出基于三维体素化和体素生长相结合的功能空间识别方法。应用验证表明, 所提出的方法可自动识别绝大多数功能空间, 并可建立维护构件及其围合空间的关系。有关方法可提高运维期空间数据补全、重建效率, 推动运维期 BIM 模型空间数据应用。

**【关键词】** 运营维护; 建筑信息模型; BIM; 体素化; 空间识别;

## 1 引言

建筑项目运行使用周期长, 运营维护成本高达全生命期成本的 85%<sup>[1]</sup>, 高效、便捷的建筑运维管理将带来极大的效益提升。然而, 传统的运营维护管理模式以纸质文档和图档为主, 信息获取困难、效率低下, 难以满足日益增长的建筑运营维护需求。建筑信息模型 (Building Information Model, BIM) 技术的提出和应用为集成各专业建筑运维信息、提升管理水平和效率带来了新的思路和方法。

近年来, 建筑运维期 BIM 应用已涉及能耗分析管理、消防疏散、室内定位导航、物业管理、设施设备维护等多个方面。相较传统基于二维图纸的建筑运维模式, BIM 为运维管理带来了丰富的三维空间信息, 包括房间、走廊等各功能空间划分、连通关系以及设施设备位置、上下游关系等等, 可有效提升运维管理的工作效率与决策水平。当前有关研究均假设 BIM 模型已包含完善的空间数据信息, 并在此基础上研究有关 BIM 模型空间数据的提取与应用方法。然而, 事实上, 当前建筑运维 BIM 获得的主要以基于图纸建模、三维扫描辅助、设计/施工 BIM 交付等方式为主, 其数据处理和建模工作量大, 主要关注工程构件及设施设备的建模, 对功能空间及设备上下游关系等数据建模的关注并不够, 有关软件工具也并不具备完善拓扑逻辑关系建模功能。

因此, 针对当前 BIM 模型空间数据不完善、缺乏完善功能空间及拓扑逻辑信息的问题, 本研究提出基于三维空间体素化的 BIM 模型功能空间识别方法。首先, 利用三维体素化算法将工程 BIM 模型及其内部空间转化为三维体素, 在此基础上, 提出基于六向体素生长的功能空间识别算法。最后, 将有关算法在不同 BIM 模型中进行了应用验证, 证明了算法的

---

**【基金项目】** 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0702107)、中国科协“青年人才托举工程”2016-2018年项目(2016QNRC001)、清华大学-广联达 BIM 研究中心(RCBIM)

**【作者简介】** 林佳瑞(1987-), 男, 助理研究员。主要研究方向为 BIM、大数据、云计算。E-mail: jiarui\_lin@foxmail.com

有效性。有关算法可自动识别 BIM 模型各功能空间及其围护构件，从而丰富运维期 BIM 空间信息，为既有运维期 BIM 空间数据应用提供有效的数据来源支撑，推动 BIM 在运维期的普及应用，具有重要意义。

## 2 运维期 BIM 空间数据应用

当前，建筑运维期 BIM 技术的研究和应用涵盖了能耗分析管理、消防疏散、设施设备管理、物业管理、室内定位导航、传感监测等多个方面<sup>[2]</sup>。具体调研分析如下：

### (1) 室内导航

Eastman C.等提出一种基于“Room-Door”的室内路径生成方法，以 Room 的中心和 Door 为节点建立路径<sup>[3]</sup>。Yan W 等提出一种以 Room 为节点，以门为边的室内路径生成方法，支持室内漫游<sup>[4]</sup>。但这些方法主要提取 BIM 模型的几何信息，没有应用空间类型等语义信息，不能过滤不能通过的私有空间。Lin Y H 等提出一种基于 FMM 的室内路径规划方法，首先将建筑室内空间划分为离散的网格，然后根据 IFC 模型中建筑几何模型和语义信息设置网格中各边是否联通，从而形成室内路径<sup>[5]</sup>。

### (2) 设施设备管理

面向设备维护维修，崔欢欢<sup>[6]</sup>通过 Revit 二次开发，提取了机电设备之间的连接关系和设备节点深度图，实现了机电设备一级与二级链接关系查询，但未考虑管道和管件。Becker<sup>[7]</sup>研究了 IFC 的设备信息表达方式，提出了一套三维多设施网模型，给出了基于 IFC 的设备拓扑提取方式。Hijazi<sup>[8]</sup>实现了 IFC 中各类构件的几何信息、拓扑信息和其他属性信息的提取。胡振中等<sup>[9]</sup>开发的机电设备智能管理系统实现了设施设备上下游关系的人工录入和补全。

### (3) 其他研究应用

Rueppel 等<sup>[10]</sup>将 BIM 与 RFID 开发了室内救援指导系统，实现了 BIM 模型室内路线信息的提取。O'Donnell 等<sup>[11]</sup>及 Bazjanac<sup>[12]</sup>研究了 BIM 模型向能耗分析模型的转换及能耗分析管理应用。

可以看出，当前有关 BIM 空间数据的研究和应用以提取、转换和利用 BIM 的既有信息为主，其基本假设是 BIM 模型已经包含了完备的三维实体、功能空间、拓扑关系等数据。而事实上，当前建筑运维 BIM 获得的主要以基于图纸建模、三维扫描辅助、设计/施工 BIM 交付等方式为主，其数据处理和建模工作量大，主要关注工程构件及设施设备的建模，对功能空间及拓扑逻辑关系的关注并不够，有关软件工具也可能缺少相应的拓扑逻辑关系建模功能。因此，建筑运维期 BIM 模型通常情况下并不具备完整的功能空间信息以及拓扑逻辑关系信息，难以直接用于上述提到的运维期导航、疏散、逃生、设备逻辑关系等空间寻径需求。

## 3 BIM 模型功能空间识别方法

功能空间包括不同用途的房间、走廊等空间，是运维空间信息的重要组成。本文采用了基于三维模型及空间体素化的功能空间识别方法。其基本流程包括 2 个部分：1) 首先通

过 BIM 模型体素化, 将各 BIM 构件及其所属空间统一转换为一系列大小相同的立方体 (也就是体素), 并记录各体素是否属于 BIM 构件; 2) 基于 BIM 模型与空间的体素化表达, 通过体素生长, 识别功能空间并确定各功能空间的维护构件。各步骤具体实现如下。

### 3.1 BIM 模型体素化

体素化是将三维形体的几何表达转换为最接近该形体的体素表达形式的过程。体素化过程产生的数据不但可以包含三维形体的表面信息, 还可包含其内部属性。通常情况下三维形体的表达可采用实体模型或表面模型。鉴于建筑运维管理过程中, 对三维形体的更新和修改较少, 往往采用分批或定期修改的形式, 因此采用表面模型表达方式较为适宜, 可有效提高模型的显示效率。而最简单的表面模型形式则是三角网格表达方式, 也就是用一系列三角形来表达或近似表达三维形体的表面。

针对三角网格表达的 BIM 构件形体, 其体素化方法可采用如图 1 所示方法。由于三角网格的基本单元为三角形, 因此三角网格的体素化可由组成三角网格的各三角形的体素化结果合并得到。因此, 可将三角网格的体素化转化为三角形的体素化。而三角形的体素化可采用图 1 右侧所示的简单形式。即根据给定的体素大小  $S$  和三角形, 按照如下步骤进行计算:

- (1) 判断三角形的最大边长  $d$  是否小于  $S$ , 如果是则停止, 计算三角形各顶点所处的体素作为体素化结果, 否则, 执行下一步;
- (2) 计算三边的中点, 并顺次连接各中点, 将原三角形划分为 4 个小三角形;
- (3) 对每个小三角形, 执行步骤(1)。

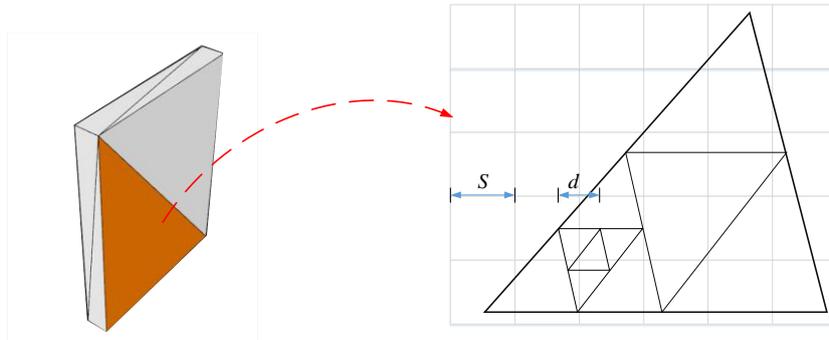


图 1 三角网格形体表达的体素化方法

基于上述算法, 可将三角网格表达的任意 BIM 构件形体表面转化为体素表达形式。但需要注意的是该方法仅能将 BIM 构件形体表面转换为体素表达, 尚未考虑 BIM 构件表面内部包围的空间。为了实现 BIM 构件表面内部空间的体素化, 可先计算 BIM 构件的轴对齐包围盒 (Axis Aligned Bounding Box, AABB), 并按照体素大小  $S$  将 AABB 包围盒转换为一系列体素, 完成 AABB 包围盒的体素化过程, 并将各体素标记为空体素。接着, 将

AABB 包围盒体素化结果与 BIM 构件表面的体素化结果重叠的体素设置为非空体素。最后，对每个空体素，在其中心位置沿 X、Y、Z 三个坐标轴分别向正向、负向发射两条射线，计算射线与 BIM 构件表面的交点和法向量。最终，可通过判断两条射线方向和法向量的夹角确定体素是否在模型内部，如果在模型内部则将其置为非空体素。

### 3.2 基于体素生长的功能空间识别

按照上述体素化方法，可将 BIM 模型各构件转化为体素表达形式，将各构件的体素表达在同一坐标系下合并，即可得到 BIM 模型的体素化表达。合并过程中，可将每个体素对应的 BIM 构件编号 (id) 与体素关联到一起。接下来，可将 BIM 模型的整体 AABB 包围盒进行体素化，并将各体素初始化为空体素。然后，依次合并各构件体素表达，并将构件编号与其覆盖的体素关联到一起。最终形成 BIM 模型整体的体素化表达。

按照上述过程完成 BIM 模型的体素化之后，可按照图 2 所示方法进行功能空间的识别。具体算法步骤如下：

- (1) 在 AABB 包围范围内，首先沿 X、Y、Z 三个方向等间距选择一批体素作为种子；
- (2) 对每个种子体素，首先判断该体素是否被遍历到，如未被遍历，则将其作为某一候选空间  $S_i$  的候选体素；
- (3) 对  $S_i$  的每个候选体素，首先判断该体素是否被遍历到，如果未被遍历，则按照图 2 右侧所示，根据不同情况依次判断当前体素的周边体素，当周边体素  $V_k$ ：
  - a) 关联了特定构件  $E_j$  编号，则将  $E_j$  视为空间  $S_i$  的围护构件；
  - b) 位于 AABB 包围盒的边界（图 2 右侧分别展示了当前体素处于包围盒内部、表面、棱边及角点的情形），则将空间  $S_i$  标记为开放空间；
  - c) 为空体素，且尚未被遍历到，则将  $V_k$  加入空间  $S_i$  的候选体素列表。

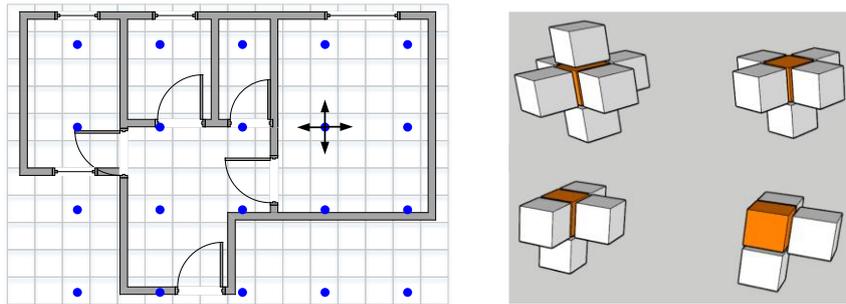


图 2 基于体素生长的空间识别

按照该算法流程，可自动识别客体、卧室、办公室等功能空间，同时可建立墙、板、门、窗等维护构件与功能空间的关系。

需要注意的是，如果 BIM 模型仅包括建筑的单层模型或局部模型，有可能仅包括顶板或底板。这种情况下，算法会将所有空间都视为开放空间。因此，可微调判断体素是否位

于包围盒边界的算法部分，将位于 AABB 包围盒顶面和底面的情形排除掉。

## 4 应用验证

本研究选择了如图 3 所示三个不同复杂度、不同特点的 BIM 模型作为典型测试数据，对提出的算法进行了应用测试。其中，图 3 左侧模型简单、空间数量少、且无任何曲面构件，图 3 右上角模型复杂、具有典型的曲面墙体、且具有部分开放式空间，图 3 右下角模型则相对较为复杂、上下均无楼板、且功能空间大小差异较大。

如图 4 为算法识别结果，可以看出本文算法可自动识别绝大多数功能空间。其中，图 4 左侧简单模型可完全识别，图 4 右上角复杂曲面模型可自动识别各重要功能空间，并将模型左侧的空间识别为开放式空间。类似的对图 4 右下角所示模型也可完成绝大多数功能空间的识别，但可看出模型中间有部分功能空间未完全识别，尚需进一步完善和优化。

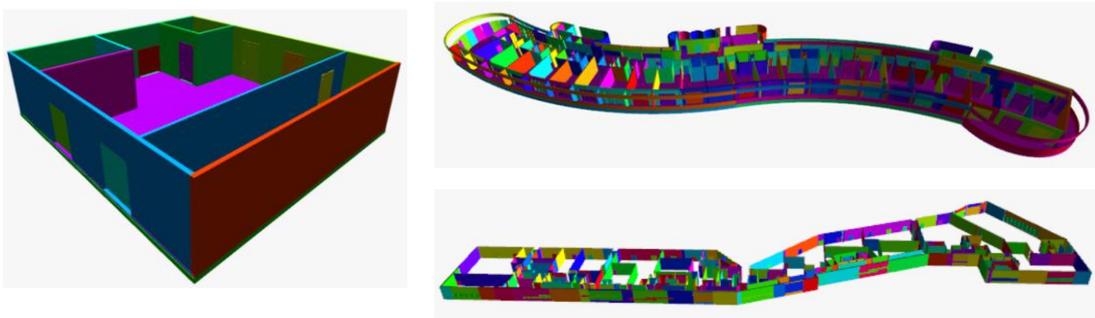


图 3 测试案例

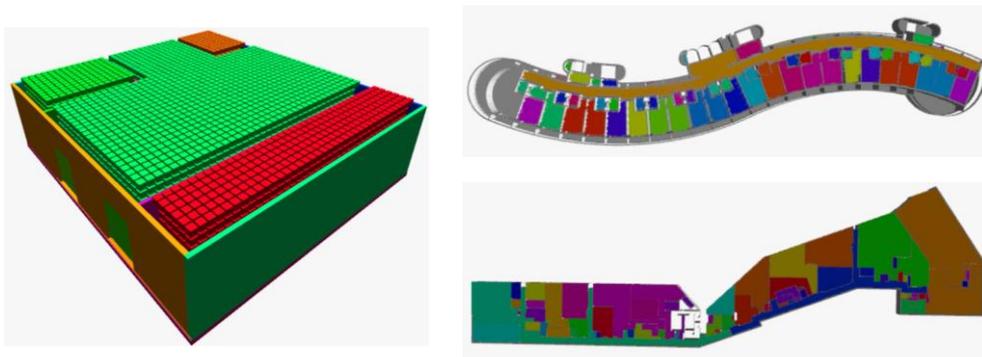


图 4 功能空间识别结果

需要注意的是，算法的计算效率严重依赖体素化过程中所选择体素的大小，体素的越小意味着对模型及其围合空间的细分程度越高，计算效率将大幅下降，限于篇幅，本文不再展示详细数据。因此，体素化及功能空间识别过程中，应根据实际需求选择合适的体素大小。根据数据测试和实际应用场景分析，本文建议通常情况下体素大小可选择 0.2-0.5m

范围。

## 5 结论与展望

面向运营维护期 BIM 空间数据需求,本研究提出基于三维体素化和体素生长的功能空间识别方法。该方法通过体素化 BIM 构件并利用体素 6 向生长,识别 BIM 构件围合的功能空间,并可建立功能空间与维护构件的关系。通过测试,该方法可自动识别绝大多数功能空间,为运维期空间数据不足、应用困难提供有效的解决办法。未来,可在本文方法基础上进一步建立各功能空间的联通、拓扑关联,并扩展有关空间数据在运维期应用的范围。充分提升运营维护管理、科学决策的水平和效率。

### 参 考 文 献

- [1] 满延磊, 谢步瀛, 张其林, 等. 基于 OGRE 和 BIM 的建筑物运行维护可视化系统平台研发[J]. 土木建筑工程信息技术, 2013(1).
- [2] 胡振中, 阳彭, 田佩龙. 基于 BIM 的运维管理研究与应用综述[J]. 图学学报, 2015,36(5):802-810.
- [3] Eastman C, Lee J, Jeong Y, et al. Automatic rule-based checking of building designs[J]. Automation in construction, 2009,18(8):1011-1033.
- [4] Yan W, Culp C, Graf R. Integrating BIM and gaming for real-time interactive architectural visualization[J]. Automation in Construction, 2011,20(4):446-458.
- [5] Lin Y, Liu Y, Gao G, et al. The IFC-based path planning for 3D indoor spaces[J]. Advanced Engineering Informatics, 2013,27(2):189-205.
- [6] 崔欢欢, 周方晓, 李智杰, 等. 基于BIM的机电设备系统建模方法[J]. 现代建筑电气, 2017(02):37-42.
- [7] Becker T, Nagel C, Kolbe T H. Integrated 3D modeling of multi-utility networks and their interdependencies for critical infrastructure analysis[C]//Advances in 3D Geo-Information Sciences. Springer, 2011:1-20.
- [8] Hijazi I, Ehlers M, Zlatanova S, et al. Initial investigations for modeling interior Utilities within 3D Geo Context: Transforming IFC-interior utility to CityGML/UtilityNetworkADE[C]//Advances in 3D Geo-information sciences. Springer, 2011:95-113.
- [9] 胡振中, 陈祥祥, 王亮, 等. 基于 BIM 的机电设备智能管理系统[J]. 土木建筑工程信息技术, 2013(1).
- [10] Rueppel U, Stuebbe K M. BIM-Based Indoor-Emergency-Navigation-System for Complex Buildings[J]. Tsinghua Science & Technology, 2008,13(Supplement 1):362-367.
- [11] O'Donnell J T, Maile T, Rose C, et al. Transforming BIM to BEM: Generation of building geometry for the NASA Ames sustainability base BIM[J]. 2013.
- [12] Bazjanac V. IFC BIM-based methodology for semi-automated building energy performance simulation[J]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.