

7-20-2021

Fast Alignment of BIM Products Based on Structure Matching

Xiaojun Liu

1. College of Information Engineering, Jiaying Nanhu University, Jiaying 314001, China;;

Changyan He

2. Normal College, Jiaying University, Jiaying 314001, China;;

Liu Chang

3. School of Information Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;;

Jinyuan Jia

4. School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Fast Alignment of BIM Products Based on Structure Matching

Abstract

Abstract: The fast alignment of BIM products based on structure matching is realized. *An Item-based Structure Graph (ISG) is proposed as the structure-aware shape descriptor for BIM products. An improved graph matching algorithm upon Factorized Graph Matching (FGM) is implemented in ISG matching, in which the mismatch caused by symmetry switching is avoided. Further extension is made to support the alignment under partial matching for BIM products from the same family.* The experiment result shows that ISG can meet the characteristics of BIM products, improve the efficiency and accuracy, and can be applied in dealing with products alignment, BIM data lightweighting, etc.

Keywords

Building Information Modeling(BIM) product, graph matching, shape alignment, Industry Foundation Classes(IFC), lightweight

Recommended Citation

Liu Xiaojun, He Changyan, Liu Chang, Jia Jinyuan. Fast Alignment of BIM Products Based on Structure Matching[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(7): 1626-1637.

基于结构匹配的建筑信息模型构件快速对齐方法

刘小军¹, 贺长雁², 刘畅^{3*}, 贾金原⁴

(1. 嘉兴南湖学院 信息工程学院, 浙江 嘉兴 314001; 2. 嘉兴学院 师范学院, 浙江 嘉兴 314001;

3. 南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063; 4. 同济大学 软件学院, 上海 201804)

摘要: 基于结构匹配思想实现了建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 构件 (或模型) 的快速对齐。提出一种构件 Item 结构图 (Item-based Structure Graph, ISG) 作为 BIM 构件特征描述符; 基于分解图匹配改进的图匹配算法被应用到 ISG 匹配过程中, 解决了构件匹配中因对称切换引起的误匹配问题; 扩展以上匹配算法, 使其支持部分匹配下的 BIM 构件快速对齐, 兼容同族类构件下自定义构件中的部分 Item 差异。实验结果表明: 该更贴合于 BIM 构件的数据特点, 能提高构件对齐的效率和准确性, 在 BIM 构件对齐、场景轻量化等过程中有较好的实用性。

关键词: 建筑信息模型构件; 图匹配; 形状对齐; 工业基础类; 轻量化

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 07-1626-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0791

Fast Alignment of BIM Products Based on Structure Matching

Liu Xiaojun¹, He Changyan², Liu Chang^{3*}, Jia Jinyuan⁴

(1. College of Information Engineering, Jiaxing Nanhu University, Jiaxing 314001, China; 2. Normal College, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China;

3. School of Information Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

4. School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The fast alignment of BIM products based on structure matching is realized. An Item-based Structure Graph (ISG) is proposed as the structure-aware shape descriptor for BIM products. An improved graph matching algorithm upon Factorized Graph Matching (FGM) is implemented in ISG matching, in which the mismatch caused by symmetry switching is avoided. Further extension is made to support the alignment under partial matching for BIM products from the same family. The experiment result shows that ISG can meet the characteristics of BIM products, improve the efficiency and accuracy, and can be applied in dealing with products alignment, BIM data lightweighting, etc.

Keywords: Building Information Modeling (BIM) product; graph matching; shape alignment; Industry Foundation Classes (IFC); lightweight

引言

智能建筑背景下, 建筑、工程和施工 (Architecture, Engineering and Construction, AEC) 产业快速发展, 建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 作为核心技术, 其数据也在急剧增长。面对大量、建筑领域特点明显的 BIM 场景及其构件数据, 如何能在充分考虑构件特征的情况下, 快速准确地定

位 (或检索) 到用户所需的构件, 已成为影响 BIM 构件再利用、场景数据轻量化^[1-2]等过程的重要因素。

模型处理方法有: ①几何模型处理方法。主要基于几何模型数据来定义合适的形状描述符以描述模型特征, 再使用该描述符进行模型对齐、相似度度量等计算, 分析模型相似性。该类方法擅长处理通用性几何模型, 有种类多, 成熟度高等特点,

收稿日期: 2020-10-16

修回日期: 2020-11-16

基金项目: 2020 年浙江省教育厅一般科研项目 (Y202044717); 嘉兴学院科研启动 (科技) 项目 (CD70519007)

第一作者: 刘小军 (1981-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为图形学、图论算法、BIM 数据分析等。E-mail: xjliu1204@126.com

通讯作者: 刘畅 (1983-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为虚拟现实, 植物建模, 3D 游戏引擎等。E-mail: 70202@nchu.edu.cn

但对于领域信息丰富的 BIM 构件, 该类方法又存在明显不足, 特别是在领域性特征表达方面, 难以灵活融合这些领域信息并进行后续计算。②BIM 构件模型处理方法。主要以国际主流格式(Industry Foundation Classes, IFC)为输入格式, 基于 IFC 文档中实体、实例及其相互引用关系等语义, 分析文档或构件等级别的相似性。然而, 该类方法又更侧重于语义层面的特征分析和关联, 几何方面则往往集中在几何属性值比较等, 忽略了 IFC 格式下较隐性的构件几何外形、几何拓扑关联等信息, 构件特征的信息综合程度仍有较大的完善空间。

综上, 对于同时包含语义和几何两方面信息的 BIM 构件模型, 当前的相关性方法往往仅侧重于考虑其中的某一方面, 导致描述的构件特征仍不够全面, 急需更加完善的特征描述及特征分析方法。

1 相关工作

BIM 构件作为一种领域模型, 在通用模型的基础上又具有自身的特殊性, 本文主要从面向几何模型的通用方法和面向 BIM 模型的领域型方法进行相关工作的综述。

1.1 面向几何模型的方法

形状检索(retrieval)是最常见的面向几何模型的相关方法, 通过比较输入模型和已有模型库中包含模型之间的特征, 确定模型相似度和检索结果, 已出现了大量的相关工作^[3-5]和实践性平台^[6-7]。然而, 与模型对齐不同, 较多的形状搜索方法更关注模型间的相似度量, 如文献[8-9]分别基于 2D 投影图片、几何数据分布统计等进行模型相似性分析, 整个过程无须进行模型对齐, 返回的结果中也不包含相似模型间的对齐映射信息。相比之下, 对齐操作的功能更强, 应用面更广。

形状配准(registration)则通过迭代逐步最小化 2 个模型特征集间的总体偏移, 并计算特征集间的最优刚体变换。主流的形状配准方法当属迭代最近点(Iterator Closest Point, ICP)算法^[10], 通过固定一个特征集而变换另一个以使变换后的 2 个特征集

间的偏移变小, 并最终收敛, 有通过总体偏移量化配准精度, 易于根据偏移量终止迭代等优点。不过, 该类方法在设计原理上已假定输入特征集间已处于大致对齐状态, 虽有部分改进工作^[11-12]出现, 但总体适用范围较窄, 不适于初始姿态差别较大的情况。

形状匹配/对应(correspondence)方法则更注重从模型的结构特征进行分析, 将模型特征表达为图结构作为输入, 如骨架图^[13]、Reeb 图^[14]以及带有属性的属性关系图(Attributed Relational Graphs, ARG)^[15]等, 再通过图匹配(Graph Matching, GM)等方法^[16-17]寻找节点最优对应关系, 进一步判断模型相似性。由于建筑模型固有的结构性特点, 较多的图结构工作与建筑相关^[18-19]。又由于图匹配本身属于多项式复杂程度的非确定性(Non-deterministic Polynomial, NP)问题, 更多面向图匹配优化的方法相继出现, 如文献[13, 20-21]等分别利用语义标注、几何尖点和上下文等预处理信息, 加快图节点对应关系的求解过程, 侧面强调了图匹配的复杂性以及辅助信息的必要性。文献[16-17]等则针对算法的求解过程, 分别通过关联矩阵分解、种子节点选取来提高图匹配效率、解决节点数不同时的图匹配问题, 特别是 Zhou 等的分解图匹配法(Factorized Graph Matching, FGM)方法, 将图匹配归结为二次分配问题(Quadratic Assignment Problem, QAP), 提出用矩阵/图分解降低算法复杂度、路径跟踪(path following)策略优化目标函数等创新性方法, 取得较好的匹配效果, 但该方法更加关注 2D 情况下的拓扑结构匹配, 对 3D 或高维特征、匹配后对应特征间的相对偏移等未涉及, 导致在类似 BIM 构件的对称性特征下, 易出现因对称节点切换(symmetry switching)等引起的误匹配现象(见图 1)。本文亦是基于该不足, 通过引入量化节点配准精度等策略对分解图匹配(Factorized Graph Matching, FGM)进行改进, 在保留算法优势的同时, 更贴合领域特征明显的 BIM 构件结构图匹配。

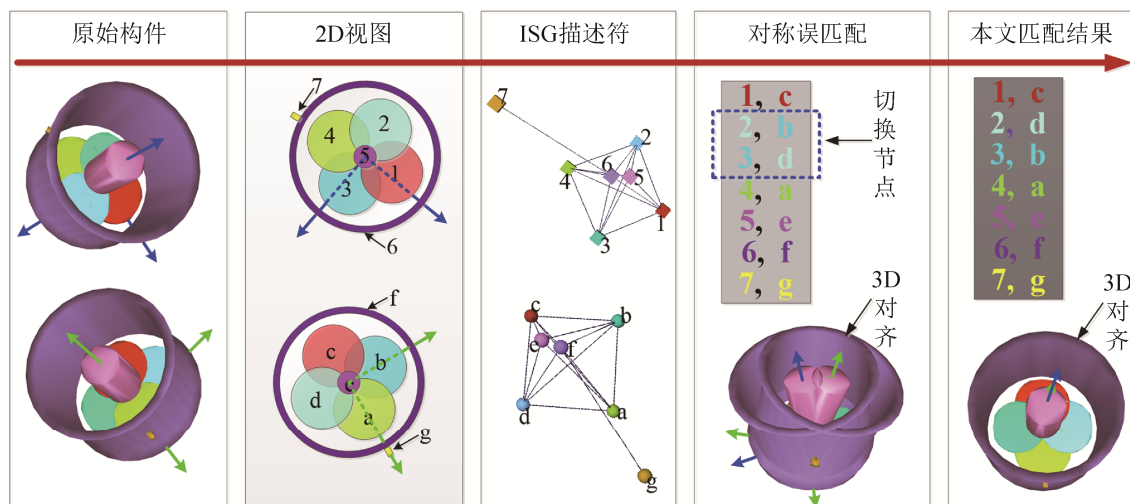


图1 构件 ISG 匹配时因对称切换问题引起的误匹配示例

Fig. 1 Example of mismatch caused by symmetry switching in ISG matching

1.2 面向 BIM 模型的方法

由于领域性模型的特点, BIM 模型方法更多与语义信息处理相关; 如 Solibri Solution Center 发布的 Solibri IFC Optimizer (SIO) 工具, 即从 IFC 文档中的语义性重复入手, 在 IFC 标准的支持下, 基于语义比对等方式检测重复性语义信息, 进一步实现语义去重和数据优化^[22]。Sun 等^[23]的 IFC Compressor 则在 SIO 的基础上引入实例间的引用关联进行语义分析, 支持参数控制的有损式语义去重。Liu 等^[2,24]也提出了进一步的方法, 通过先分析构件的 IFCRepresentationItem 等语义属性及其逻辑意义, 确定重复构件的候选集及 Item 对应关系, 再引入 Hausdorff 距离进行几何模型相似性验证, 来确定重复构件。不过, 以上工具或方法, 虽为 IFC 文档优化提出较好的方案, 但均以单个 IFC 文档为输入, 将文档内各构件之间的引用等关联信息作为输入来辅助重复信息检测, 不适于处理多文件存储或无引用信息辅助的 BIM 构件处理。

对于多文件存储的 BIM 构件, Ge 等^[25]基于 IFC 标准建立领域本体, 结合文档上下文信息对本体概念进行消歧处理, 最后通过潜语义分析 (Latent Semantic Analysis, LSA) 对文档进行分类和索引, 一定程度上表达了文档之间的相似性; Liu 等^[26]则通过分析领域概念的语义特点, 引入显式语义分析

(Explicit Semantic Analysis, ESA) 方法对上述方法进行扩充, 并提供 BIMSeek 构件搜索原型系统进行有效性验证; 后续的 BIMSeek++^[27]则更是对 BIMSeek 进行集成性完善, 引入 Tversky 相似性对 BIM 实例间的属性相似度进行考量。

可见, 建筑领域的 BIM 构件包含丰富的几何、语义和实体引用关系等关联信息, 而现有方法又往往仅侧重于以上信息中的某些方面, 缺少能同时表达这些信息的综合性方法, 导致描述的构件特征不够全面, 用户查找不准确。本文将 BIM 构件信息融合性表达为一个类似属性关系图的 ISG 结构, 并进一步通过改进图匹配算法来实现 ISG 的快速匹配和构件对齐。

2 本文方法

整个 ISG 结构图的创建完全根据 IFC 标准中的原始 BIM 构件信息, 通过解析当前 BIM 构件 (IFCProduct) 所引用的 Item (IFC RepresentationItem) 实例, 主要包含构件属性、由 Item 表示的节点以及由 Item 间关联表示的边三方面的信息, 简单的定义描述如下:

$$ISG = \{A, V, E\}$$

式中: A 为构件属性集; V 为节点集合; E 为边集合。

从图 2 可以看出 ISG 为无向图。如此, BIM

构件的对齐操作即可转换为 ISG 结构的匹配问题, 且对 2 个待匹配的 $ISG_1 = \{A_1, V_1, E_1\}$, $ISG_2 = \{A_2, V_2, E_2\}$ 。

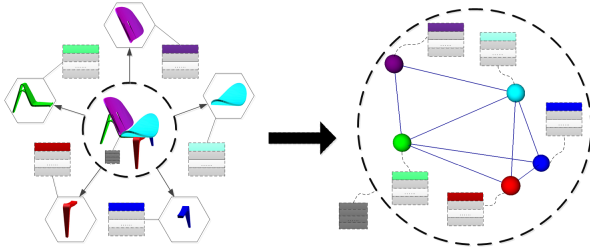


图 2 构件 ISG 特征描述符构建示例

Fig. 2 Diagram of ISG shape descriptor generation

(1) ICP 算法

ICP 算法通过计算 2 个特征向量集间的最优刚体变换来达到对齐目的, 使得变换后两个向量集之间的距离最小。 V_1, V_2 作为 2 个节点集合, 将其特征组成向量集后, 可建立 ICP 优化模型进行求解:

$$\min_{X, T} F_{ICP}(X, T) = \sum_{v_1^i \in V_1, v_2^j \in V_2} x^{i,j} \|v_1^i - T \cdot v_2^j\|^2 \quad (1)$$

式中: i_1, i_2 分别为 V_1, V_2 中的节点序号; X 为 0,1 置换矩阵, 表示节点间的 1-1 对应关系; $x^{* \#}$ 为 X 中的元素, 值为 1 时表示序号为 * 和 # 的节点相对应; T 为与 X 对应的变换矩阵; $\|\cdot\|$ 为欧式距离。

(2) FGM 算法

FGM 则属于图匹配算法, 把图匹配问题归结为一个二次分配问题 (Quadratic Assignment Problem, QAP)。将特征信息量化到图节点和边的匹配权重后, 同时考虑节点和边的最优对应关系, 使得最终对应关系下的权值总和最大化。对应的优化模型描述为

$$\max_X F_{FGM}(X) = \sum_{i_1, j_1} x^{i_1, j_1} w_v^{i_1, j_1} + \sum_{\substack{i_1 \neq j_1, i_2 \neq j_2 \\ e_1(i_1, j_1)=1 \\ e_2(i_2, j_2)=1}} x^{i_1, j_1} x^{i_2, j_2} w_e^{e_1, e_2} \quad (2)$$

式中: i_1, j_1 和 i_2, j_2 分别为 V_1, V_2 中的节点序号; c_1, c_2 为 E_1, E_2 中的边序号, 分别代表端点为 V_1 中的 i_1, j_1 号节点和 V_2 中的 i_2, j_2 号节点的边; $e(*, \#)=1$ 表示节点 *, # 之间存在边; X 的意义与式(1)中相同; $w_v^{i_1, j_1}$, $w_e^{e_1, e_2}$ 则分别为 i_1, i_2 号节点和 c_1, c_2 号边的匹配权值。

可见, FGM 中的 2 个 $\sum$ 部分分别表示匹配节点和匹配边的权值和, 常规的 QAP 求解过程往往先根据以上两部分构建较大的矩阵 K , 将模型转化为以下模型再求解:

$$\max_X F_{GM}(X) = \text{vec}(X)^T K \text{vec}(X).$$

FGM 则提出创新性求解方法, 首先对以上的矩阵 K 进行分解; 其次分析求解模型的凹凸性, 提出通过凹凸松弛和路径跟踪策略对以上优化模型进行改进, 并改进 Frank-Wolfe 算法对其进行近似求解。解决了现有方法中, 高维矩阵运算、复杂度高, 准确率低等不足。

(3) 本文 ISG 匹配方法

理论上 ICP 和 FGM 算法都可以实现 BIM 构件的对齐操作, 并返回节点对应关系 X 。但它们又各有优缺点: ICP 适于刚性变换下的特征集配准, 有易于量化配准精度、方便及时终止迭代过程等优点, 但其假设初始特征集已处于大致对齐状态的设计原理, 使其从根本上不适于姿态多样化的 BIM 构件对齐过程, 另外稀疏的 ISG 节点同样会影响该算法的准确率; FGM 基于匹配权重从图节点和边两方面同时考虑匹配优化问题, 全面集成已有信息, 求解算法在全面的理论分析下, 对现有算法在核心细节上有较大改进, 且有易于扩充、支持部分匹配等优点。只是该方法考虑了部分匹配, 在扩展到本文的(部分)刚体模型匹配问题时, 该方法在当前迭代下节点匹配精度的量化、图节点对称时的匹配等方面仍存在改进空间, 易出现不能及时掌握当前匹配情况, 造成无意义迭代运算、对称节点下匹配时因对称节点切换(symmetry switching)而导致的误匹配等现象。

由于本文处理的 BIM 构件属于刚体模型, 在 ISG 构建(见图 2)完成后, 结合以上 2 种算法优势, 建立改进的 ISG 匹配(ISG Matching, ISGM)模型:

$$\max_X F_{ISGM}(X) = \sum_{i_1, j_1} x^{i_1, j_1} w_v^{i_1, j_1} + \sum_{\substack{i_1 \neq j_1, i_2 \neq j_2 \\ e_1(i_1, j_1)=1 \\ e_2(i_2, j_2)=1}} x^{i_1, j_1} x^{i_2, j_2} w_e^{e_1, e_2} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \frac{1}{N} \sum_{i_1, i_2} x^{i_1 i_2} \| \text{barycenter}(v_{i_1}^{i_1}) - T \cdot \text{barycenter}(v_{i_2}^{i_2}) \|^2 < \varepsilon_1 \quad (4)$$

式中: $\text{barycenter}(*)$ 为节点*对应数据的几何重心; N 为匹配节点的个数; ε_1 为对齐精度, 默认取当前 BIM 构件外接球直径的 0.1 倍。式(3)为基于式(2)表达的 FGM 模型, 式(4)则为式(1)的扩展。

可见, 改进后的 ISG 匹配模型, 仍主要基于 FGM 的 QAP 思想进行迭代寻优, 但在每次迭代结束时则借鉴 ICP 的方式进行当前寻优效果的判断, 并在结果满足条件时及时终止迭代过程, 在保留 FGM 高效、灵活、支持部分匹配等优势的同时, 规避了由于对称节点切换(symmetry switching)而导致的误匹配现象。式(3)~(4)只是在优化模型级别的改进, FGM 中由于对称节点切换而导致的误匹配, 主要是图的节点和边的匹配权重 $w_v^{i_1 i_2}$ 和 $w_e^{c_1 c_2}$ 无法较好地地区分对称性节点。为此, 本文进一步采用 ISG 预匹配、ISG 匹配以及 ISG 部分匹配来预先进行构件过滤和对称节点切换、同族类构件中部分 Item 发生改变等情况的改进, 流程图如图 3 所示。

3 ISG 特征描述符构建

本文以 IFC 格式的 BIM 构件作为输入数据, 提出的构件 ISG 特征描述符能更好地融合 IFC 格式中的语义和几何信息, 全面表达当前构件在专业和通用领域的特征信息。IFC 是一套专为建筑行业制订的开放数据格式标准, 包含了上千个预定义的实体和属性类型^[28]。整个标准采用面向对象语言 express 描述, 通常的 IFC 文件由文件头和数据区两部分组成, 数据区作为数据主体, 主要通过定义一系列的实体实例和实例属性来进行信息表达, 实例之间的关联则以引用的方式进行描述, 如图 4 所示。

基于 IFC 标准中的 BIM 构件(IFCProduct)定义, 即一个构件实例引用了多个 Item (IFC RepresentationItem)实例, 且构件实例和 Item 实例之间都对应着相应的语义属性和几何数据, 通过自定义 BIM 构件的解析过程进行特征抽取, 将 BIM 构件特征表示为一个三元组描述的无向 Item 结构图 $ISG(A, V, E)$ 。

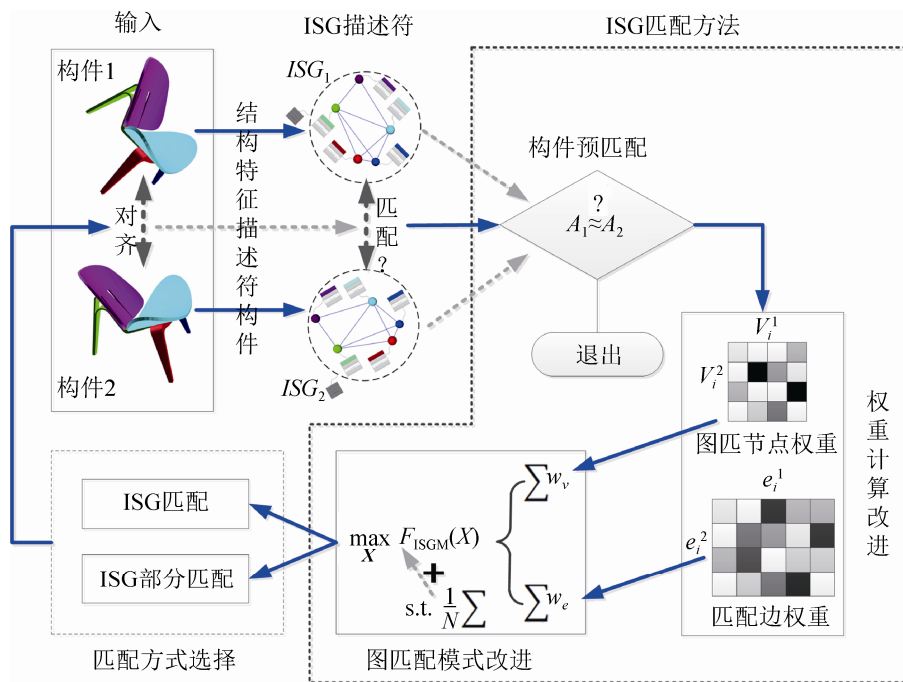


图3 本文方法的大致流程图

Fig. 3 Flow chart of our method

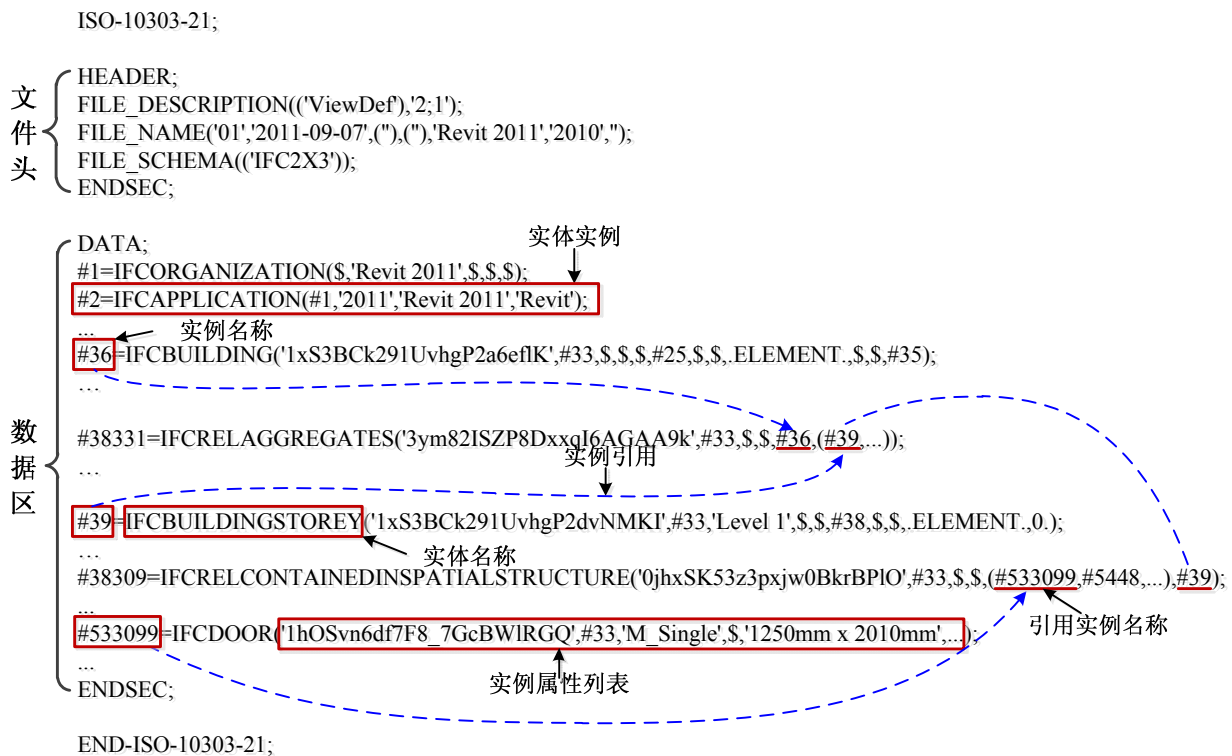


图 4 IFC 示例文件及其说明
Fig. 4 Content information of an IFC file

具体的 ISG 构建过程如下:

(1) 构件属性集 A : BIM 构件实例本身即含有相应的属性或属性引用实例, 如图 4 中名称为“#533099”的“实例属性列表”部分, 整理这些属性作为构件的全局性特征, 可用于 ISG 匹配的预备知识和 ISG 的后续扩展, 本文主要从语义和几何两部分包含了构件类型和 ISG 拓扑统计信息, 具体如下:

1) 构件类型信息: 如图 4 中的“IFCDoor”作为属性集 A 中的第 1 维信息;

2) ISG 拓扑统计信息: 主要对 ISG 中的节点度数进行统计, 以类似递归的方式, 依次取最大的节点度数 D_1 以及度为 D_1 的节点数, 作为第 2 和第 3 维; 取第 2 大的节点度数 D_2 以及度为 D_2 的节点数, 作为第 4 和第 5 维; 取第 q 大的节点度数 D_q 以及度为 D_q 的节点数, 作为第 $2q$ 和第 $2q+1$ 维, 依此类推, 直到最小度数以及对应的节点数作为倒数第 2 和第 1 维为止, 本文采用示例如下:

$$A = \{\text{"IFCDoor"}, 4, 2, 3, 2, 2, 1\};$$

(2) 图节点集合 V : 每个 *Item* 实例作为一个图节点, *Item* 实例的几何数据和语义数据均作为当前节点的属性信息, 且将 *Item* 的几何重点(*barycenter*)作为对应节点的空间位置属性, 方便直接用于图匹配时节点间距离等计算;

(3) 图的边集合 E : 各节点间根据对应 *Item* 的几何空间关系, 建立相应的边信息来表达相互的 *Item* 关联, 通过式(5)所示的过程建立节点之间的边:

$$e(i, j) = \begin{cases} 1, & \min_{distance}(Item_i, Item_j) \leq \varepsilon_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: i, j 为节点序号, $e(i, j)=1$ 即序号为 i, j 的节点间存在边, 否则不存在; $\min_{distance}(A, B)$ 则代表 A, B 两个 *Item* 所包含几何顶点间的最近距离; ε_2 为最近距离调整参数, 默认取 BIM 构件外接球直径大小的 0.05 倍。

如此形成的 ISG 不仅包含构件本身的语义和几何信息, 还结合引用关系、几何空间位置等对这些信息进行了较好的融合, 方便后续的扩展和 ISG

匹配时的信息调用。

4 ISG 匹配

在对匹配模型进行改进后(见式(3)~(4)), ISG 匹配更侧重于对匹配算法的改进, 针对同族类构件存在部分相似、现有算法中出现对称节点误匹配等情况, 提出的改进算法能在兼容部分匹配的同时, 规避以上的误匹配现象。如此, 本部分通过 ISG 全匹配和部分匹配, 来分别讨论对称性节点和同族类构件部分相似的情况处理。对待匹配的构件特征对 $ISG_1=\{A_1, V_1, E_1\}$, $ISG_2=\{A_2, V_2, E_2\}$, 首先基于构件属性 A_1, A_2 进行构件预匹配, 筛选真正需要匹配计算的候选 ISG 集, 再进行候选集下的全匹配或部分匹配计算。在面对大量的 BIM 构件时, 构件属性集 A 的参与更能快速规避一些不必要的运算, 迅速降低计算规模, 方便算法扩充的同时, 更能起到较好的预匹配效果。

4.1 ISG 预匹配

当前的 ISG 构件属性集主要包含构件类型和 ISG 拓扑统计两部分特征, 基于这些特征, 本文方法在 ISG 匹配前进行 2 次构件预匹配, 以确定 ISG 候选对有较高的匹配率, 才进入后续的 ISG 匹配或部分匹配运算:

(1) 构件类型预匹配: 以字符串比较方式, 只有字符串相同(即类型相同)的构件才进入后续过程;

(2) ISG 拓扑统计预匹配: 将统计结果表达的向量 A , 维度不同时通过高维补 0 方式使维度相等, 再基于向量相似度进行过滤, 本文采用余弦相似度进行:

$$\cos \theta = (A_1 \cdot A_2) / (|A_1| |A_2|)$$

其中: A_1 和 A_2 分别对应 A_1, A_2 中的拓扑统计信息向量, 只有当 θ 值小于设定值(如 $\pi/12$)时, 构件才进入后续过程。

构件预匹配通过较简单的策略, 对不可能匹配的构件进行过滤, 减小了后续匹配中复杂运算的规模。但仍存在一定的构件, 需要通过 ISG 匹配来达

到构件对齐的目的。

4.2 ISG 全匹配

已有的 FGM 算法存在对称节点切换(symmetry switching)而导致的误匹配情况, 主要是由于 FGM 中图节点和边的匹配权重 $w_v^{i_1 i_2}$ 和 $w_e^{c_1 c_2}$ 计算方法无法较好地区分对称性节点, 特别是在计算边匹配权重时, 采用边的长度等标量来参与权值计算, 使得最终的权重值对节点和边的空间位置不敏感。经实验, 本文引入方位角函数 atan2 参与边匹配权值的计算, 具体如下:

$$w_e^{c_1 c_2} = \exp \left(\frac{w_{\text{length}}(e_1^{c_1}, e_2^{c_2}) - w_{\text{angle}}(e_1^{c_1}, e_2^{c_2})}{2} \right) \quad (6)$$

式中: c_1, c_2 分别为集合 E_1 和 E_2 中的边序号; w_{length} 和 w_{angle} 分别为匹配边的长度分量和方位角分量, 计算过程如下:

$$\begin{cases} w_{\text{length}}(e_1^{c_1}, e_2^{c_2}) = \frac{|length(e_1^{c_1}) - length(e_2^{c_2})|}{\min(length(e_1^{c_1}), length(e_2^{c_2}))} \\ w_{\text{angle}}(e_1^{c_1}, e_2^{c_2}) = |\arctan2(e_1^{c_1}.y, e_1^{c_1}.x) - \arctan2(e_2^{c_2}.y, e_2^{c_2}.x)| \end{cases}$$

且 $e_1^{c_1}$ 为边 $e_1^{c_1}$ 对应的向量, $e_2^{c_2}$ 的意义与 $e_1^{c_1}$ 类似, 根据 e^c 的 2 个端点节点及其重心(barycenter)值, 可直接进行边长 $length(e^c)$ 及边对应向量 e^c 的计算。

对于节点匹配权值 $w_v^{i_1 i_2}$, 考虑到边匹配时, 其权值最终由节点数据计算得到, 即边匹配权值与节点匹配权值存在较大的相关性, 在此直接将节点匹配权值置 0, 即 $w_v^{i_1 i_2} = 0$

如此, 输入以上匹配权重 $w_v^{i_1 i_2}$ 和 $w_e^{c_1 c_2}$, 以式(3)~(4)表达的优化模型进行迭代, 当迭代结果满足其中的约束条件, 即满足 ε_1 精度时, 认为全匹配成功, 否则不成功。

4.3 ISG 部分匹配

全匹配不成功的构件, 仍可能存在部分匹配的情况。作为领域性模型, BIM 构件的建模往往会借鉴已有的专业类族库模型, 并基于该族库模型来进行构件的自定义设计。

图 5 为地铁中的轧机类构件, 由于放置的位置不同构件所含的 Item 不同, 但由于属于同族类构件, 均包含了相应的公共 Item 部分。分析其数据特点可知, 需通过 ISG 部分匹配(partial matching)对类似的同族类构件进行识别, 使得公共部分达到最优部分匹配即可, 且此时的部分匹配又与形变后的非刚体结构图匹配不同, 是在保持部分刚体特征的情况下, 进行的部分图结构匹配。受种子图匹配方法^[17]启发, 本文采用匹配节点距离排序的策略, 在进行 ISG 匹配迭代时, 将基于式(4)得到的当前迭代下的匹配节点距离进行排序:

$$d(i_1, i_2) = \| \text{barycenter}(v_1^i) - T \cdot \text{barycenter}(v_2^j) \|^2 \quad (7)$$

式中: v_1^i 和 v_2^j 为当前匹配节点; i_1, i_2 为各自的节点序号, 只取距离较小的前 $N(N>3)$ 对匹配节点代入式(4)的运算即可, 即只需 N 个节点形成的子图匹配结果满足匹配精度, 即认为达到部分节点的最优匹配。

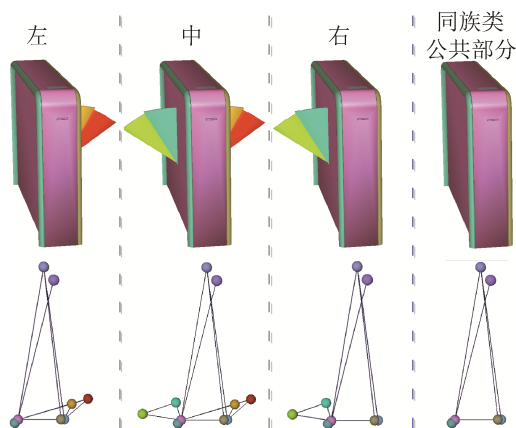


图 5 同族类构件示例及其对应的 ISG 特征
Fig. 5 ISG features of products from same family

ISG 全匹配或部分匹配, 为领域性 BIM 构件, 及其对称、部分刚体结构匹配等特征进行了针对性匹配改进, 最后返回的节点对应关系 X 及对齐变换矩阵 T , 可用于 BIM 场景轻量化、构件检索等多种应用中。

5 算法实验与性能分析

基于前面的算法介绍, 以下通过实验对其有效

性及改进效果等进行验证性分析。实验数据(见表 1, 部分见图 6)以 IFC 格式表达, 主要来自公开数据集 Open IFC Model Repository^[29]和 building SMART^[30]的官方示例以及实践性项目, 由于规模不同, 部分数据由多个 IFC 文件描述, 为了减少各方面的影响, 实验过程中采用多次测试取平均值作为最终结果。实验用的电脑配置为 Intel i5-3210M 处理器, 8.0 GB 内存, NVIDIA GeForce 610 M 显卡及 64 位 Windows 8 操作系统。代码实现上主要使用 C++实现, BIM 数据的解析方面, 通过自定义的 IFCOpenShell^[31]工具进行。

5.1 算法效率分析

与改进前的 FGM 匹配相比, 本文的 ISG 匹配算法对匹配结果的状态更加敏感, 能及时检测当前模型迭代下的收敛情况, 并在达到精度要求时快速终止并返回收敛结果。为了对比改进前后的算法效率, 整理实验数据集中的构件(部分见图 7(a)), 并在数量较丰富的类型构件中抽样形成包括楼梯、门等 7 类共 4 781 个构件, 以及预匹配后的 82 477 个候选对进行匹配迭代次数分析, 其中 3 种方法的初始最大迭代次数均设置为 81, 具体的平均迭代次数比较结果如图 7(b)所示。

表 1 测试数据列表
Tab. 1 Test data in our experiment

序号	名称	数据量 /M	IFC 文件数
1	Duplex A 20110505	2.311	1
2	301110FZK-Haus-EliteCAD	7.191	1
3	Schultz Residence	21.940	1
4	0912102010-03-01 Project	50.726	1
5	161210Med Dent Clinic Combined	109.996	1
6	SG CsSj Project	154.270	1
7	SG-M13-CZ-WNL-ARC	270.093	1
8	Zg mobile Room-1	369.151	2
9	Ch-Subway-130215	384.438	3
10	Cgm-Project-12	429.433	3
11	Zhe-YY-Scene-1	1854.620	10
12	Luyanon-Project	2904.770	16

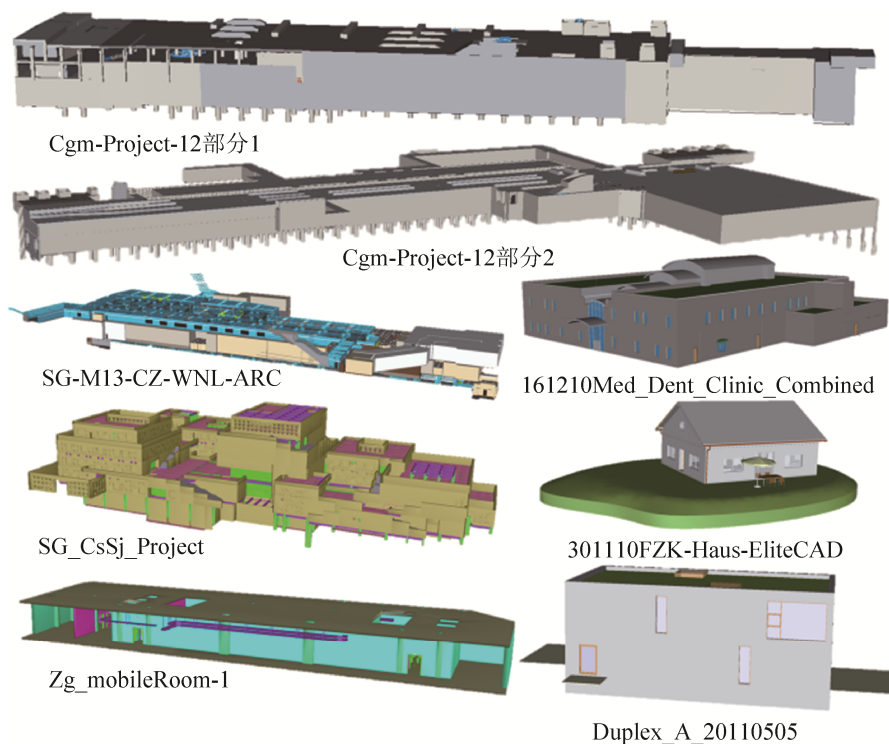
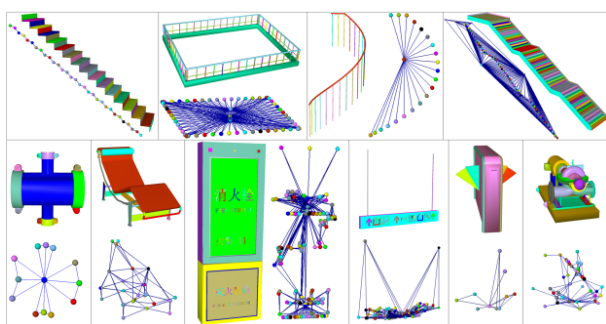
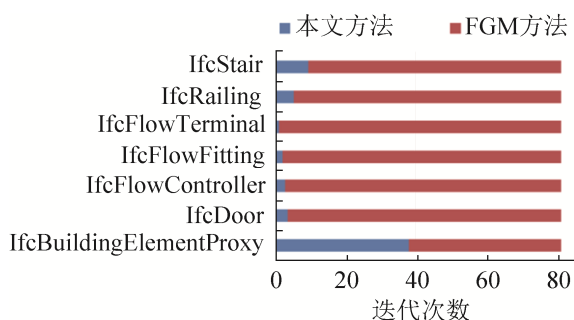


图 6 部分实验数据可视化效果

Fig. 6 Visualization of some experimental data



(a) BIM 构件实例及其对应的 ISG 描述符示意图



(b) 平均迭代次数比较结果

图 7 算法效率统计分析结果

Fig. 7 Result of efficiency analysis

可见, 在算法效率上, FGM 主要通过

运行前设置算法迭代次数的方式, 整个寻优过程只有在迭代次数达到该设定值(如 81)时才结束。而本文方法则通过模型优化、构件属性预匹配等方式进行 ISG 匹配改进, 不仅有利于规避对称节点切换现象, 更能灵活根据当前迭代结果及时结束迭代过程, 避免不必要的迭代运算。本文方法的迭代次数大大低于 FGM 方法的默认设置, 且大部分在 20 次迭代内即可达到最优匹配, 有较高的算法效率。

5.2 对齐精度比较

在 BIM 构件中, 构件对齐结果可直接作为 BIM 构件检索的结果依据。为了更好地以实践的方式检验本文方法的对齐精度, 将以上 2 种方法进行集成, 并应用到构件检索实验中, 通过检索结果来逆向检验和分析对齐精度。整理 5.1 节中的 82 477 个匹配对的匹配结果, 并作为构件检索结果进行分析, 在查全率轴向上随着 ε_1 从小到大(即 10^{-6} ~1 倍的构件外接球直径大小)进行统计。在同样的匹配精度下与 FGM 算法进行对比, 其中 FGM 中的参数直接来自文献[16], 主要为

$$\begin{cases} w_v^{i,j} = \exp(-\|barycenter(v_1^i) - barycenter(v_2^j)\|) \\ w_e^{c_1,c_2} = \exp\left(-\frac{1}{2}|d_1^{c_1} - d_2^{c_2}| - \frac{1}{2}|\theta_1^{c_1} - \theta_2^{c_2}|\right) \end{cases}$$

式中: d^{c*} 为 c^* 号边的长度; θ^{c*} 为 c^* 号边与 X, Y 平面的角度。

得到的查准率-查全率曲线如图 8 所示。

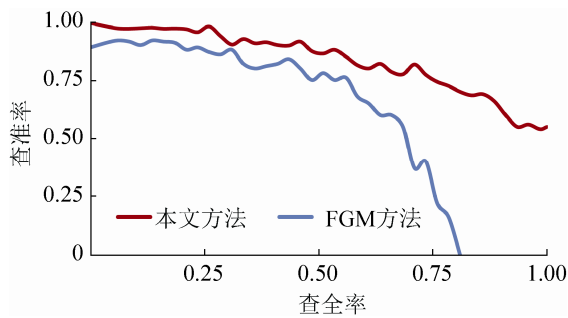
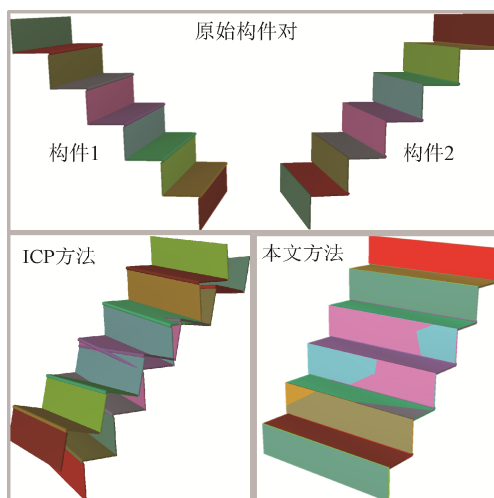
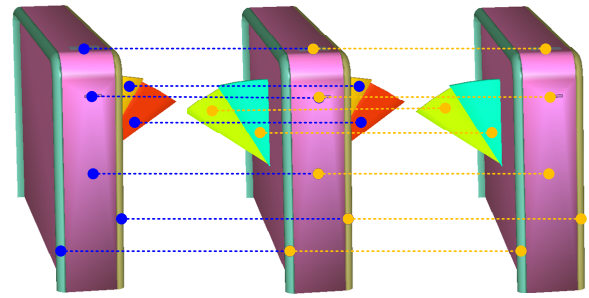


图 8 BIM 构件检索分析结果
Fig. 8 Result of products retrieval analysis

可以看出, 本文方法的 ISG 描述符以及改进的 ISG 匹配方法有较好的构件区分能力, 同时基于改进的 ISG 匹配算法能较好地兼容多样化的 BIM 构件特征, 用于构件检索时的查准率、查全率能同时达到约 75%。对于 FGM 易出现对称节点切换 (symmetry switching) 的事实, 在图 1 即已有可视化效果, 为了进一步描述本文算法与 ICP 算法的构件对齐效果, 在此选择 2 个 BIM 构件中较常见的楼梯构件, 图 9(a) 所示即为相应的对比效果, 图 9(b) 为另一组部分匹配结果示例。



(a) ISG 匹配与 ICP 方法对齐结果对比示例



(b) ISG 部分匹配示例结果

图 9 算法精度统计分析结果
Fig. 9 Result of the accuracy analysis

综上, 由于楼梯构件特征有对称、接近线型 (见图 7(a)) 等特点, 特征稀疏、构件初始姿态角度大等对 ICP 算法的对齐效果有很大影响, 甚至得不到最优效果; 而 ISG 匹配则有较好的健壮性, 能在较特殊特征下保持较好的匹配精度, 图 9(b) 所示的部分匹配结果更加验证了算法较好的健壮性。

5.3 BIM 场景轻量化分析

在用于 BIM 构件检索的同时, 由于 BIM 场景中存在大量的重复性构件, 进一步地将本文算法用于 BIM 场景的冗余构件检索, 主要通过检索并去除场景中重复构件所引起的重复性冗余, 实现场景的轻量化。在此将本文算法应用到 BIM 场景轻量化实际案例中, 通过检测并去除 BIM 场景数据中的重复性冗余构件, 基于式(8)表示的去冗率与现有方法 Solibri IFC Optimizer (以下简称 SIO)^[22], IFCCompressor^[23] 以及 Liu 等的方法^[2]进行对比, 具体见图 10。

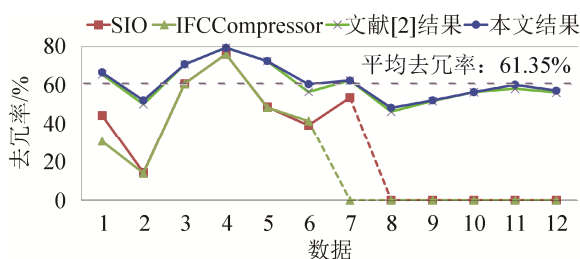
去冗率 =

$$\text{重复构件数据量} / \text{场景总体数据量} \times 100\% \quad (8)$$

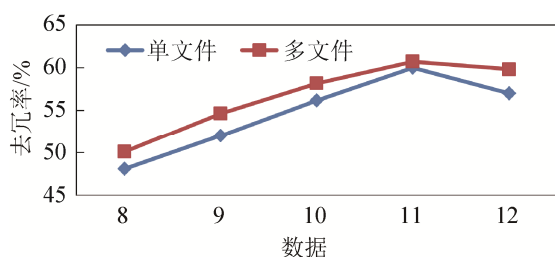
由于 SIO, IFCCompressor 以及文献[2]中的方法均只面向单个 IFC 文件, 需要文件内的实体信息及引用关联等信息, 本文方法则可在处理文件内重复冗余的同时, 还可通过 ISG 匹配进行跨文件的构件关联, 实现多文件间的重复冗余构件检测。

可见, 以单个文件处理时, 在 1~7 号规模较小的数据下, 4 种方法均能达到较好的效果, 但相比之下, 本文方法和文献[2]中的方法效果更加明显, 且本文方法稍好, 说明文献[2]中只通过语义来分析

Item 对应关系仍不够全面。而随着数据规模的增加,如达到数据 8~12 时, SIO 和 IFCCompressor 方法已不够稳定(见图 10(a)中的虚线部分),本文方法则仍能以较小的优势领先,平均去冗率约 61.35%。对于多文件处理时,图 10(b)表明本文基于 ISG 匹配的方法不仅可用于多文件间的重复构件检测和去冗处理,同时能使去冗率进一步提高约 2%,返回的构件匹配、对齐等信息可直接用于轻量化后的场景快速恢复,更重要的是建立了多文件间构件的相似性关联,进一步支持场景内多文件间构件的关联及后续扩展。



(a) 以单个文件进行的去冗处理结果比较



(b) 本文方法单文件和多文件方式去冗结果比较

图 10 BIM 场景数据轻量化分析和比较

Fig. 10 Comparison analysis in BIM scenes lightweighting

6 结论

随着 BIM 技术的发展和普及,出现了大量甚至海量的 BIM 场景及构件数据,针对场景轻量化、构件检索等领域性构件处理中的核心操作——构件对齐,本文以国际标准 IFC(Industry Foundation Classes)作为 BIM 构件数据格式,充分考虑该数据的领域性特点和构件特征,提出基于结构匹配的 BIM 构件(或模型)快速对齐方法。首先提出一种基于建筑 Item 结构图(Item-based Structure Graph, ISG)的 BIM 构件特征描述符,有效融合构件的通用性

和领域性特征,拟通过 ISG 匹配来实现构件对齐;而鉴于建筑构件中固有的对称性特征,一种基于分解图匹配改进的图匹配算法被应用到 ISG 匹配过程中,解决了对称特征下因对称切换(symmetry switching)引起的误匹配问题;考虑到构件建模时往往先查找已有族库类构件,再基于这些构件进行自定义设计的特点,对改进的图匹配算法进行扩展,使其进一步支持部分匹配(partial matching)下的 BIM 构件快速对齐,兼容同族类构件下自定义构件中的部分 Item 差异;最后的验证性实验对本文方法的效率、精度等进行较全面的分析,并通过场景轻量化实例说明本文方法在 BIM 专业领域的构件检索、基于 BIM 构件重复性冗余的 BIM 场景轻量化等方面有较好的实用性。

同时,本文的三元组 $ISG=\{A, V, E\}$ 定义及其实例化数据主要在 BIM 场景轻量化、BIM 构件检索中进行了相应的实践性试验,仍有很多方面要去探索,如在使用过程中发现,ISG 在存储方面也较灵活,占用空间少,同样适合于做构件库中的构件索引;ISG 中的属性等可根据实际需要进一步扩展,为当前较热门的图卷积、图学习等图论相关算法提供丰富的研究数据。

参考文献:

- [1] Gao G, Liu Y S, Wang M, et al. A Query Expansion Method for Retrieving Online BIM Resources based on Industry Foundation Classes [J]. Automation in Construction (S0926-5805), 2015, 56: 14-25.
- [2] 刘小军, 贾金原. 面向手机网页的大规模 WebBIM 场景轻量化实时漫游算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(3): 274-292.
Liu Xiaojun, Jia Jinyuan. Mobile Web-based Lightweight and Real-time Roaming Algorithm for Large-scale WebBIM Scenes[J]. Sci Sin Inform, 2018, 48(3): 274-292.
- [3] Li B, Godil A, Aono M, et al. SHREC'12 Track: Generic 3D Shape Retrieval[C]// Eurographics Conference on 3d Object Retrieval. Goslar, Germany: Eurographics Association, 2012: 119-126.
- [4] Lian Z, Godil A, Daoudi M, et al. A Comparison of Methods for Non-rigid 3D Shape Retrieval [J]. Pattern Recognition (S0031-3203), 2013, 46(1): 449-461.

- [5] Xie J, Dai G, Zhu F, et al. DeepShape: Deep-Learned Shape Descriptor for 3D Shape Retrieval [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence (S0162-8828), 2017, 39(7): 1335-1345.
- [6] Chen J, McGinty L, Connor O, et al. A Search Engine for 3D Models of Museum Artefacts[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2012, 22(1): 83-105.
- [7] Yeggi. Search Engine for 3D printable Models[DB/OL]. [2020-11-06]. <https://www.yeggi.com/>.
- [8] Chen D Y. On Visual Similarity Based 3d Model Retrieval[J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2003, 22(3): 223-232.
- [9] Dobkin D, Funkhouser T, Osada R, et al. Shape Distributions[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2002, 21(4): 807-832.
- [10] Besl P J, McKay N D. A Method for Registration of 3-D Shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2002, 14(2): 239-256.
- [11] Bouaziz S, Tagliasacchi A, Pauly M. Sparse Iterative Closest Point [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2013, 32(5): 113-123.
- [12] Colas F, Siegwart R. A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Mobile Robotics [J]. Foundations and Trends in Robotics (S1935-8253), 2015, 4(1): 1-104.
- [13] Au K C, Tai C L, Cohen-Or D, et al. Electors Voting for Fast Automatic Shape Correspondence [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2010, 29(2): 645-654.
- [14] Mohamed W, Ben, Hamza A. Reeb Graph Path Dissimilarity for 3D Object Matching and Retrieval[J]. Visual Computer (S1432-2315), 2012, 28(3): 305-318.
- [15] Quan L, Tang K. Polynomial Local Shape Descriptor on Interest Points for 3D Part-in-whole Matching[J]. Computer-Aided Design (S0010-4485), 2015, 59(C): 119-139.
- [16] Zhou F, Torre F D L. Factorized Graph Matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2016, 38(9): 1774-1789.
- [17] Fishkind D E, Adali S, Patsolic H G, et al. Seeded Graph Matching[J]. Pattern Recognition (S0031-3203), 2019, 87: 203-215.
- [18] Wang Y, Xu K, Li J, et al. Symmetry Hierarchy of Man-Made Objects[J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2011, 30(2): 287-296.
- [19] Mitra N, Wand M, Zhang H, et al. Structure-aware Shape Processing[C]// SIGGRAPH Asia 2013 Courses. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2013: 1-20.
- [20] Sahillioğlu Y, Yemez Y. Partial 3-D Correspondence from Shape Extremities [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2014, 33(6): 63-76.
- [21] Laga H, Mortara M, Spagnuolo M. Geometry and Context for Semantic Correspondences and Functionality Recognition in Man-Made 3D Shapes[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2013, 32(5): 1-16.
- [22] Pazlar T, Turk Ž. Evaluation of IFC optimization[C]// CIB W78 conference on Bringing ITC knowledge to work. Faculty of Civil Engineering: Maribor, Slovenia, 2007: 61-65..
- [23] Sun J, Liu Y S, Gao G, et al. IFCCompressor: A Content-based Compression Algorithm for Optimizing Industry Foundation Classes files [J]. Automation in Construction (S0926-5805), 2015, 50(2): 1-15.
- [24] Liu X, Xie N, Tang K, et al. Lightweighting for Web3D Visualization of Large-scale BIM Scenes in Real-time [J]. Graphical Models (S1524-0703), 2016, 88: 40-56.
- [25] Ge G, Yu-Shen L, Meng W, et al. BIMTag: Semantic Annotation of Web BIM Product Resources Based on IFC Ontology[J]. Advanced Engineering Informatics (S1474-0346), 2017, 31: 48-61.
- [26] Liu H, Liu Y, Pauwels P, et al. Enhanced Explicit Semantic Analysis for Product Model Retrieval in Construction Industry[J]. Transactions on Industrial Informatics (S1551-3203), 2017, 13(6): 3361-3369.
- [27] Nanxing L, Qian L, Yu-Shen L, et al. BIMSeek++: Retrieving BIM Components using Similarity Measurement of Attributes[J]. Computers in Industry (S0166-3615), 2020, 116: 103186.
- [28] BuildingSMART. Industry Foundation Classes (IFC) [DB/OL]. [2020-11-06]. <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>.
- [29] Amor R, Dimyadi J. An Open Repository of IFC Data Models and Analyses to Support Interoperability Deployment[C]// 27th Annual International CIB W78 Conference. Rotterdam (Netherlands): Cairo, Egypt. 2010.
- [30] Sjøgren J. The Norwegian building SMART program [M]//eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction. London: CRC Press, 2020: 661-663.
- [31] Liu X, He C, Zhao H, et al. ExteriorTag: Automatic Semantic Annotation of BIM Building Exterior Via Voxel Index Analysis[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2021, 41(3): 48-58.