

基于构件形状分布和配准位置的 BIM 模型对比方法

王 佳^{1,2}, 吴 磊¹, 周小平^{1,2}, 宋冰玉³, 李亮辉⁴

- (1. 北京建筑大学电气与信息工程学院, 北京 100044;
2. 建筑大数据智能处理方法研究北京市重点实验室, 北京 102616;
3. 盈嘉互联(北京)科技有限公司, 北京 100041;
4. 北京市首发高速公路建设管理有限责任公司, 北京 101117)

摘 要: 建筑全生命周期的各个阶段中会出现各种不同版本的 BIM 模型, 其间的差异可以对建筑的施工和运维阶段提供决策支持。大部分 BIM 模型对比都是基于目视检查、手动计数和选择性属性检查。尽管目前有学者和相关机构研究了一些自动比较 BIM 模型的方法, 但大多依赖于模型中构件的 ID, 而且比较的结果无法直观地体现到具体构件、具体属性上。针对以上问题, 提出了一种基于形状分布和位置配准的 BIM 模型对比方法, 即提取构件特征进行构件匹配, 从构件级进行 BIM 模型对比。首先根据构件的几何信息构造构件的形状分布, 计算类型相近构件的形状分布之间的相似度; 再配准构件的位置, 计算位置之间的相似度; 然后结合 2 个相似度进行构件匹配, 比较匹配构件之间的差异; 最后得出模型间的差异, 并利用 WebGL 进行可视化展示。该方法忽略了构件 ID 变化对模型对比的影响, 并且能得出模型构件级别的差异。

关 键 词: 建筑信息模型; 模型对比; 忽略构件 ID; 形状分布; 构件匹配; 可视化展示

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2020030480

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2020)03-0480-10

Comparison method of BIM models based on component shape distribution and registration position

WANG Jia^{1,2}, WU Lei¹, ZHOU Xiao-ping^{1,2}, SONG Bing-yu³, LI Liang-hui⁴

- (1. School of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;
2. Beijing Key Laboratory of Intelligent Processing for Building Big Data, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;
3. BIM Winner (Beijing) Technologies Co. Ltd., Beijing 100041, China;
4. Beijing Capital Development Expressway Construction Management Co. LTD, Beijing 101117, China)

Abstract: Various versions of BIM models will appear in different stages of the entire life cycle of a building, and the differences among these models can provide support for the decision-making in the construction and operation of the building. Most BIM model comparisons are based on visual inspection, manual counting, and selective inspection of attributes. Although some scholars and relevant institutions have studied some methods of automatic comparison of BIM models, most of them rely on the ID of components in the model, and the results of comparison cannot be directly reflected in specific components and attributes. Aimed at these problems, a comparison method of

收稿日期: 2019-11-01; 定稿日期: 2020-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(71601013); 北京市自然科学基金项目(4202017); 北京市青年拔尖人才培养项目(CIT&TCD201904050); 北京建筑大学青年英才项目

第一作者: 王 佳(1969-), 女, 北京人, 教授, 博士, 硕士生导师。主要研究方向为 BIM 技术、建筑消防等。E-mail: wangjia@bucea.edu.cn

通信作者: 周小平(1985-), 男, 福建寿宁人, 副教授, 博士。主要研究方向为大数据、机器学习和建筑信息模型。E-mail: lukeyfchou@gmail.com

BIM models was proposed based on shape distribution and registration position, extracting features from components for component matching and comparing BIM models on the component level. Firstly, shape distribution of the components was constructed based on their geometric information to calculate the similarity between the shape distribution of components of similar types. Secondly, the positions of the components were matched and the similarity between the positions was calculated. Then two similarity degrees were combined to match components and the differences between matched components were compared. Finally, the difference between models was obtained, and WebGL was used for visual presentation. This method disregards the influence of the changes of component ID on model comparison, capable of working out the differences among models on the component level.

Keywords: building information modeling; model comparison; ignore component ID; shape distribution; components matching; visual presentation

建筑信息模型(building information modelling, BIM)以三维数字化技术为基础,集成工程项目规划、设计、施工、运维等各个阶段的信息^[1]。随着城市建设的不断加快,BIM 技术在建筑全生命周期中的应用越来越广,各个阶段中出现的不同版本的 BIM 模型也越来越多。其中有些是因为需求的变化而修改的模型,而有些是因为设计、施工与运维方^[2-3]对 BIM 模型的标准不一样^[4]。在以往的模型对比中,只能通过目视和手动检查的方式找出不同版本之间差异,无法直接观察,费时费力,结果具有的准确度和可信度也不高^[5]。因此,能自动检测出模型之间差异的对比方法成为了 BIM 领域的迫切需求,其对于建筑全生命周期推广和应用也具有巨大的影响。

目前,对比不同版本之间 BIM 模型的差异是各国学者与行业相关的公司研究的热点。一些学者提出根据工业基础类(industry foundation classes, IFC)格式文件进行 BIM 模型对比,其中部分学者根据 IFC 文件的文本信息对比 IFC 文件的差异^[6],但忽略了 IFC 文件中的结构,只对比了文本之间的差异,其结果对于整个 BIM 模型没有实际的意义。XIN 等^[7]提出基于 IFC 内容构造模型树状图,利用树状图来对比 2 个 IFC 文件之间的差异的方法。该方式只是针对 IFC 文件进行的,对比的结果只是 IFC 文件中各个实例实体之间的差异,即使是专业人员也难读懂之间的差异。国内外 BIM 领域相关公司的平台或网站,例如广联达的 BIMFACE^[8]、盈嘉互联的小红砖^[9]、Autodesk 的 Navisworks^[10]等软件推出了基于构件 ID 的对比方法,该方法能够准确得出 2 个模型中相同 ID 构件的差异。但是在模型版本更

替过程中,构件 ID 随时会发生改变,即使是在同一个模型,同时导出的 2 个相同版本中,ID 也有可能发生变化。在不同版本中的 BIM 模型中,ID 变化更为明显。而该方法直接将 ID 发生改变的构件视为新增/删除的构件。并且构件的并行运算可以提高计算效率和内部储存性能^[11]。针对以上 BIM 模型对比现在存在的问题,本文提出了一种全新的 BIM 模型对比方法。该方法主要有以下几点创新和贡献:①忽略构件 ID 对 BIM 模型造成的影响,而根据构件形状分布和位置信息进行构件匹配;②从构件级进行 BIM 模型对比,得到模型构件级别的差异;③通过三维可视化的方式将对对比结果展示出来。

该方法在进行模型对比时,首先构造模型所有构件的形状分布,利用形状分布来表示一个构件,计算形状分布之间的相似度;通过坐标系配准所有构件的位置,计算位置相似度;位置相似度与形状分布的相似度结合,进行构件匹配;最后比较相匹配构件之间的差异,并将比较结果通过三维可视化的形式展示出来。基本框架如图 1 所示。

1 模型信息与形状分布

1.1 BIM 模型信息

BIM 是建设项目的物理特性与功能特性的数字化表示,且是从建设项目的最初概念设计开始的整个生命周期里做出任何决策的可靠共享信息资源^[12]。BIM 模型不仅作为建筑模型的可视化表达,还是大量建筑数据的载体。本文主要从构件级来比较 2 个版本 BIM 模型之间的差异,构件的信息包括建筑构件的几何信息、位置信息和属性信息等。

1.1.1 几何信息

一个 BIM 模型是由若干个不同类型的构件组成, 构件一般是由若干个三角面拼接而成, 其中三角面的点的坐标和三角面的拼接规则构成了构件的几何信息。几何信息中的点集, 根据三角面的索

引组成若干个三角面, 三角面根据其位置又构成了构件的三角网格模型, 再通过几何信息中的颜色索引规则, 渲染三角网格的颜色, 最终得出构件的真实模型。本文通过构件的几何信息来构造构件的形状分布。

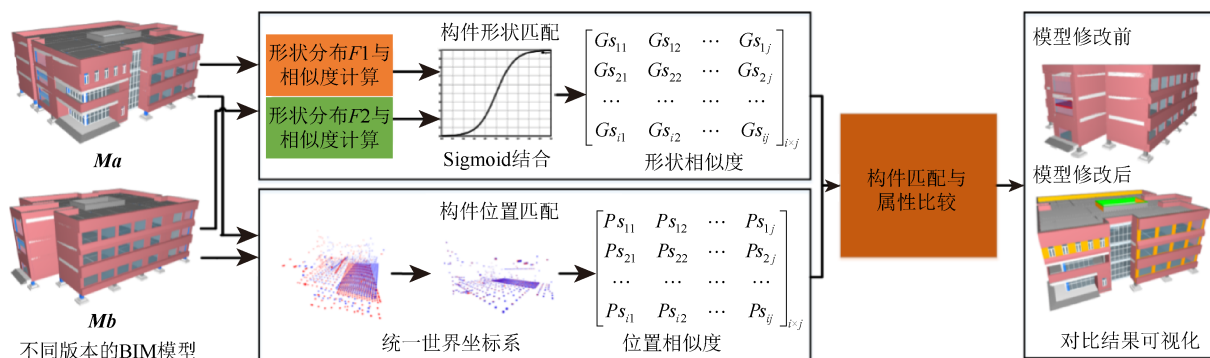
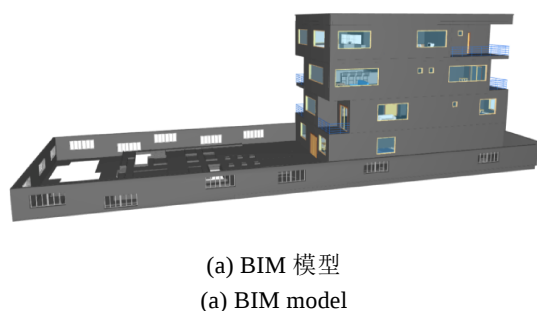


图 1 基于形状分布和位置配准的 BIM 模型对比方法研究框架

Fig. 1 Research framework of BIM model comparison method based on shape distribution and registration position

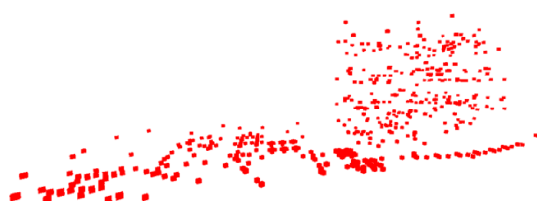
1.1.2 位置信息

BIM 模型中构件的位置信息是指构件在其世界坐标系下的坐标位置信息, 一般来说, 一个构件含有一个 (x, y, z) 的坐标位置信息。在 BIM 模型版本更替的过程中, 模型的世界坐标系有可能发生改变, 同时构件的坐标位置信息也就发生了变化, 而大部分构件之间的相对位置是不会发生变化的。如图 2 所示, 图 2(a)为 BIM 模型, 图 2(b)为用立方体代替 BIM 模型中构件的构件位置图, 本文将以此进行构件位置的匹配。



(a) BIM 模型

(a) BIM model



(b) 构件位置

(b) Components position

图 2 BIM 模型与其构件位置

Fig. 2 BIM model and its components position

1.1.3 属性信息

BIM 模型构件的属性信息主要分为 2 个部分, 第一部分为建筑设计师在建造 BIM 模型时, 建模软件自动生成的一些构件所固有的信息。以 Revit 三维建模软件为例, 构件所固有的信息包括构件的标高、族类型、限制条件等等。第二部分为建筑设计师根据项目需求, 在构件和模型子系统添加的项目信息或者模型系统信息等。BIM 模型不同版本之间的变化也主要体现在属性信息的变化。

1.2 形状分布方法

在 BIM 模型中, 构件样式众多、大小不一, 比较大的 BIM 模型在构件数量上能够达到几万, 所以需要一种能够准确地描述构件特征的形状函数, 而且具有快速性, 对构件的旋转、移动、翻转不敏感等特征。国外有学者提出了 5 种构造构件形状分布的方法^[13], 本文在此基础上做了相关实验, 并选择了其中 2 种结果相对好的方法, 作为本文构造形状分布的方法:

方法 1. 测量若干组构件中心点到表面任一随机点的距离, 定义为 $F1$, 采用该方法得出的形状分布定义为 $F1$ 分布。

方法 2. 测量若干组构件表面 2 个随机点之间的距离, 定义为 $F2$, 采用该方法得出的形状分布定义为 $F2$ 分布。

构造构件的形状分布主要步骤为:

步骤 1. 以三角面面积为权重在构件表面选

取若干组随机点(构件由若干三角面组成),并计算2个随机点之间或者随机点到中心点的欧式距离。

步骤 1.1. 遍历组成 3D 模型的所有三角面,计算其面积,并将其每次的累积结果储存到面积数组中;

步骤 1.2. 生成一个 0 到最大面积之间的随机数,以每个三角面的面积为权重,通过二分法来选择一个随机的三角面;

步骤 1.3. 在选择三角面 ABC 的边 BC 上选择一个随机点 P_1 ,再在边 AP_1 上选择第 2 个随机点 P ,第 2 个点 P 就是选择出来的随机点,如图 3 所示。

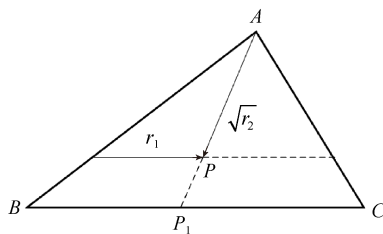


图3 三角面中取随机点

Fig. 3 Random points in the triangle

$$P = (1 - \sqrt{r_2})A + \sqrt{r_2}(1 - r_1)B + r_1\sqrt{r_2}C \quad (1)^{[13]}$$

其中, r_1 和 r_2 为 0 到 1 之间的一个随机数, r_1 表示从顶点 B 到顶点 C 距离的百分比, $\sqrt{r_2}$ 则表示顶点 A 到边 BC 距离的百分比。根据式(1)取得的点为随机三角面中的随机点。

步骤 2. 根据步骤 1 得到的所有距离,统计其在 0 到最大距离之间的分布情况,最后得到一个分布数组,也就是构件的形状分布。

采用以上的方法选取若干组随机点,并计算 2 个随机点或者随机点到中心点的欧式距离。在步骤 2 中,统计步骤 1 的距离结果,计算其在 0 到最大距离的分布,得到一个 B 维的形状分布数组,该数组就是构件的形状分布。

由图 4 可以看出,门和窗构件在外形上存在相似性,又存在细节上的差异,二者形状分布曲线整体相似,但也存在细节上的差异,说明形状分布的方法能够有效地表达构件之间的共性与差异。在构件的形状分布图中,横坐标为随机采样距离与其中最大值的比值,用百分数表示,纵坐标表示分布在该距离比值的概率。

形状分布能够快速地将三维模型转化为参数化的向量,使其更加容易与其他构件进行对比,该

向量是构件唯一的签名。并且形状分布的方法构造的形状分布曲线具有对于构件的平移、旋转、镜像的不变性。再者形状分布的方法采样随机,对小的扰动不敏感,具有一定的鲁棒性。因此本文将用形状分布的方法进行实验。

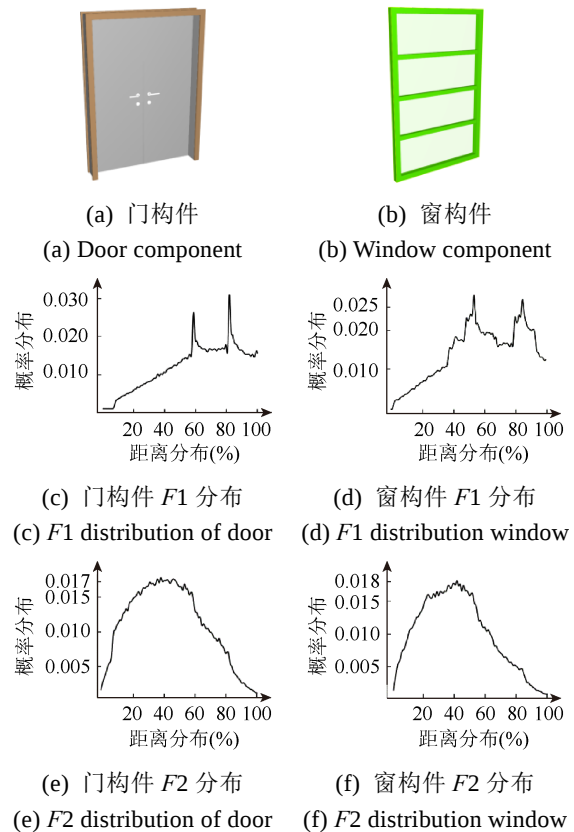


图4 构件及其形状分布

Fig. 4 Components and their shape distribution

2 构件匹配与模型对比

本文是从构件级来比较 BIM 模型不同版本之间的差异。①通过构件的几何信息建立构件的形状分布;②计算 2 个 BIM 模型(Ma , Mb)同类型的每 2 个构件之间的几何相似度 G_s (geometrical similarity);③配准 2 个模型的坐标系,并计算同类型的每 2 个构件之间的位置相似度 Ps (position similarity);④根据 2 个相似度结合的结果,对构件进行一一匹配;⑤对匹配结果中的每一对构件进行属性的比对,最终得出具体到 2 个模型构件级别上的差异。本文的创新主要体现在构造形状分布和 2 种形状分布的结合上,将构造形状分布和形状相似度结合分作 2 个步骤,而坐标系的匹配和构件的匹配合并成 1 个步骤,所以从输入 2 个 BIM 模型开始,该方法主要包括:

2.1 构造形状分布

在第 1 节中介绍了 2 种构造形状分布方法, 其对构件的描述具有更高的准确性, 而且在构造形状分布时, 由于每一组取得随机点数较少, 所以在耗时上也优于其他几种方法。在本节中将主要针对 $F1$ 与 $F2$ 分布的特点与其中参数的选择进行展开。

图 5(a)~(d) 分别是形状分布方法 $F1$ 和 $F2$ 来描述多个构件的形状分布曲线图。横坐标为 2 个点之间的欧式距离, 纵坐标为 2 个点之间欧式距离的概率分布。图 5(a)和(b)计算了 5 个 bathtub 类的构件, 分别采用 $F1$ 和 $F2$ 分布, 图 5(c)和(d)用 2 种方式描述了 6 类不同的构件。可以看出, $F1$ 在描述同类型构件形状分布的表现不及 $F2$, 而 $F2$ 在描述不同类型构件的形状分布的区别没有 $F1$ 明显, 所以本研究将结合 2 种方式来进行实验。

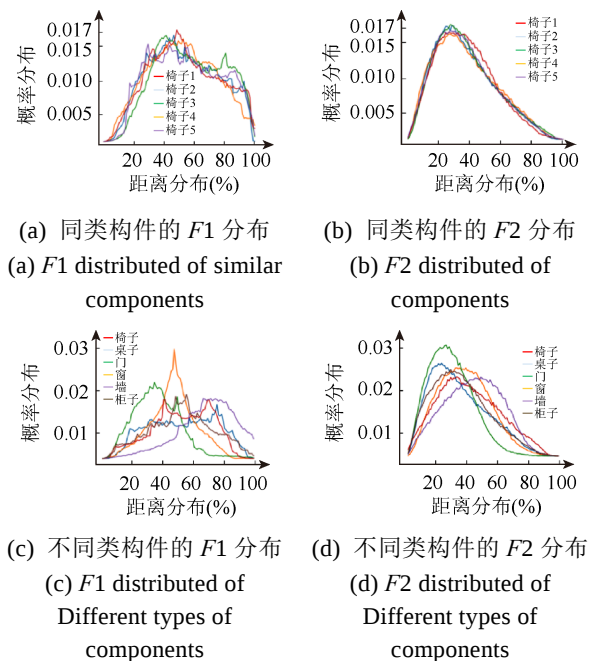


图 5 同类和不同类构件的 $F1$ 和 $F2$ 分布
Fig. 5 $F1$ and $F2$ distribution of the similar and different types of components

在选择了形状分布方法之后, 接下来就是选择一个合适的采样数 N 和概率分布向量 B 的维度。为此, 本文实验的样本数 N 从 1 万开始, 每次增加 1 万个数据量, 每次采样 2 组, 并计算其间的相似度, 迭代到 N 为 100 万数据量为止。根据实验得出, 随着采样数量 N 的增加, 形状分布曲线越来越稳定, 其不同次采样的形状分布之间的相似度也越来越高, 相似度向 1 收敛。图 6 和

图 7 分别测试了 2 个不同形状分布方法的采样相似度, 图 8 测试了 2 个不同构件之间的相似度, 并将相似度与 $N=100$ 万时稳定的相似度相减, 取其绝对值。可以看出, 在采样数 N 为 20 万, 得到的形状分布趋近稳定, 不同次构造的形状分布之间的相似度足够高 (≥ 0.9996)。而形状分布向量 B 为 100 维时, 得到的效果较优, 所以在本文中以 $N=20$ 万, B 为 100 维进行实验。

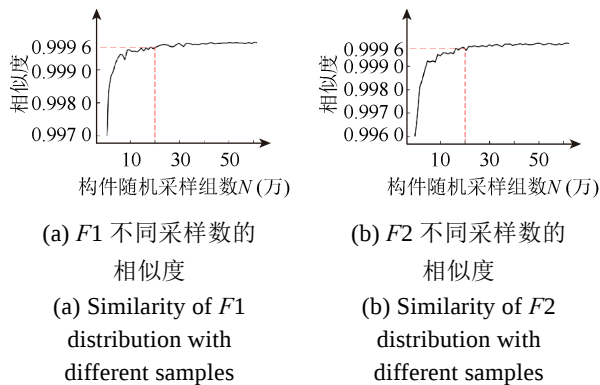


图 6 门构件不同采样数的相似度
Fig. 6 Similarity of different sampling numbers of door

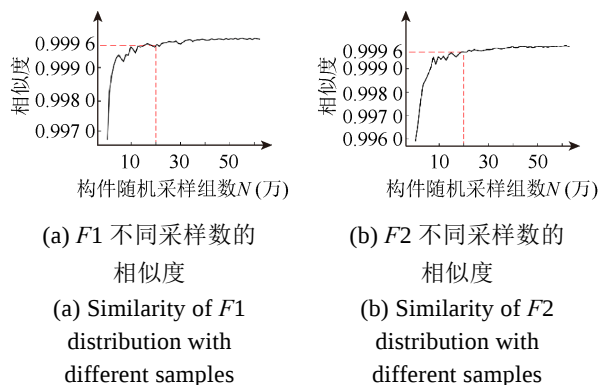


图 7 窗构件不同采样数的相似度
Fig. 7 Similarity of different sampling numbers of window

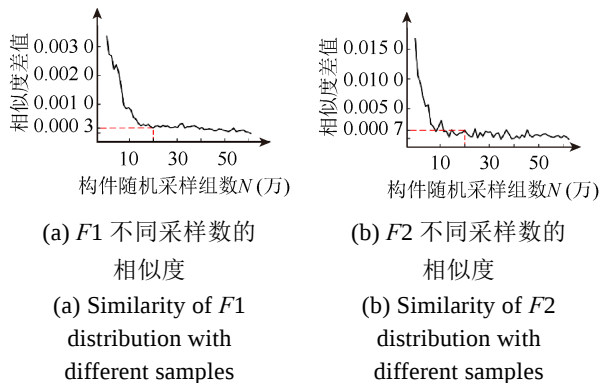


图 8 不同构件不同采样数的相似度差值
Fig. 8 Similarity of different sampling numbers of different components

根据以上的方式,可以得到 2 个 BIM 模型所有构件的形状分布向量,该形状分布向量可以用作构件的特征和唯一的签名,为接下来的相似度计算提供了便利。

2.2 形状分布相似度

本文在 2.1 节中从形状分布曲线分析了 2 种形状分布的优劣势,本步骤将从具体相似度上分析 2 种形状分布的特点,并给出 2 种形状分布的结合方式。

在构造了构件的形状分布之后,需要评估各个构件形状分布之间的相似度,即几何相似度 G_s 。本文尝试了多种简单的差异度量方式,包括欧式距离^[14]、明可夫斯基距离、曼哈顿距离、余弦相似度、J-S 散度、Wasserstein 距离、Hellinger 距离和皮尔森相关系数。其中欧式距离、明可夫斯基距离和曼哈顿距离虽然能够表达出构件形状分布之间的相关性,只能得出 2 个形状描述向量之间的距离数值,无法准确的描述出 2 个构件之间具体的相似度。其在构件相关性推荐上可以使用,而本文需要衡量具体的相似度,所以不采用以上 3 种方式进行评估。J-S 散度、Hellinger 距离和 Wasserstein 距离所表现的结果与实际构件之间的相似程度差别较大。余弦相似度和归一化之后的皮尔森相关系数则能准确地得出一个从 0 到 1 之间的数值,用来表示 2 个形状分布之间的相似度。而余弦相似度得出的结果相对于实际情况会偏大。而 Pearson 相关系数能够有效的反映出构件形状变化之间的差异,所以本文将使用 Pearson 相关系数来度量形状分布之间的相似度。Pearson 相关系数能够得到 2 个形状分布之间的线性相关性,其值在 $[-1, 1]$ 之间。在本文中,负相关性并不能表示构件之间的相似性,所以只考虑正相关性,相关性为负的值全部处理为 0,从而达到相似度的归一化。Pearson 相关系数为^[15]

$$S_p(f, g) = \frac{n \sum f_i g_i - \sum f_i \sum g_i}{n \sqrt{\sum f_i^2 - (\sum f_i)^2} \sqrt{\sum g_i^2 - (\sum g_i)^2}} \quad (2)$$

图 9(a)为 10 个同类构件之间的对比,图 9(b)为 10 个不同类构件之间的对比,每个小方块代表 2 个构件之间的形状相似度,颜色越深代表其间的相似度越高。采用的方法为只采用 $F1$ 分布、只采用 $F2$ 分布和将 2 种方式结合的方法。由图 9(a)可以看出,现形状分布方法 $F1$ 在描述同类构件之间的相似度时,准确率没有 $F2$ 高。由图

9(b)可以看出,描述不同类型的构件时, $F2$ 所表现出来的差异又不及 $F1$ 明显。所以在评估同类型的构件时, $F1$ 构造的形状分布之间的相似度较低, $F2$ 构造的形状分布之间的相似度较准确。而不同类型的构件, $F2$ 构造的形状分布之间的相似度较准确, $F1$ 构造的形状分布之间的相似度较准确。

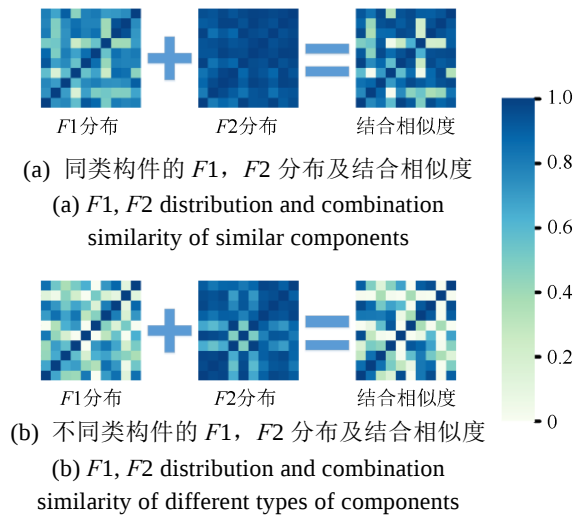


图 9 $F1$, $F2$ 分布及其结合在不同情况的表现

Fig. 9 $F1$, $F2$ distribution and their combination in different situations

本文发现绝大多数情况下 $F1$ 分布得到的相似度偏低, $F2$ 得到的相似度偏高,两者之间的相似度更能反应出 2 个构件之间的相关性。本文在结合相似度的过程中,采取了线性权重的方法和 sigmoid 结合的方法。线性权重的方法得到的相似度分布均匀,没有明显的相似与不相似的界限。而 sigmoid 方法在横坐标小于一定值时,结果变化明显,能有效得出相似度的阈值。由于 $F2$ 分布得出的相似度偏高,所以在结合相似度时,将 $F2$ 所得相似度 S_{P2} 作为相似度上限, S_{P1} 作为自变量。相似度结合的方式为

$$S(S_{P1}, S_{P2}) = \frac{S_{P2}}{1 + e^{\alpha S_{P1} + \beta}} \quad (3)$$

其中, S_{P1} 和 S_{P2} 分别为 2 个构件的形状分布之间的相似度,且分别根据 $F1$ 和 $F2$ 所构造的形状分布计算得出的。当 α 与 β 分别为-12 与 6 时,得到的结果更能有效地区分是否相似。当 α 与 β 分别为-14 与 7 或者其绝对值更大时,得到的相似度会偏高。当 S_{P1} 大于 0.7 时, S_{P1} 的变化对结合相似度影响较小。当 α 与 β 分别为-10 与 5 或者其绝对值更小时,得到的相似度会偏低,结合相似度会向 S_{P1} 靠近,

是否相似的界限不明显。所以本文 α 与 β 都以-12 和 6 进行实验。从图 9 可以看出在评估同类构件时, $F2$ 的表现较优, 评估不同类构件时, $F1$ 较优, 而将其进行 sigmoid 结合, 正好弥补了相互之间的缺点, 得到了一个更好的效果。

通过以上的方, 计算 2 个模型之间构件的几何相似度, 得出一个 $i \times j$ 的相似度矩阵, 其中模型 $\mathbf{Ma}$ 的构件数量为 i , 模型 $\mathbf{Mb}$ 的构件数量为 j 。为了减少矩阵内数据量, 在相似度对比之前, 先对构件做了初步筛选, 不同类的构件之间的几何相似度直接判定为 0, 用稀疏矩阵来存储相似度, 从而减少了矩阵的数据量和计算量, 具体为

$$\mathbf{Gs}(\mathbf{Ma}, \mathbf{Mb}) = \begin{bmatrix} Gs_{11} & \cdots & Gs_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Gs_{i1} & \cdots & Gs_{ij} \end{bmatrix}_{i \times j} \quad (4)$$

2.3 构件位置配准与位置相似度

在 BIM 模型版本更替的过程中, 对于模型的位置信息, 很容易出现如下问题: ①无法保证模型的坐标系保持不变; ②一些构件只是偏移了很微小的位置, 例如门窗的朝向、管道的上下移动等等, 对根据构件位置来匹配模型构件造成了很大的影响。

为了解决第①个问题, 本文测试了多种点云数据配准的方法^[16-18], 并从中选择了效果最好的 SVR 方法来统一 2 个模型的坐标系^[16]。以图 10 中的高级住所为例, 首先从构造形状分布所取的随机点中, 抽取一部分(每个构件 100 个点)来充当每个模型的点云数据, 该点云数据为模型表面的点云数据。接下来利用点云匹配算法进行 2 个模型点云数据的配准。配准之后得到模型表面点云数据配准的旋转矩阵, 该旋转矩阵也是整个模型配准的旋转矩阵。模型表面点云数据配准的点云分布图如图 10 所示, 绿色为模型 $\mathbf{Ma}$ 的点云坐标, 红色为模型 $\mathbf{Mb}$ 的点云坐标, 蓝色为模型 $\mathbf{Mb}$ 配准之后的点云坐标。

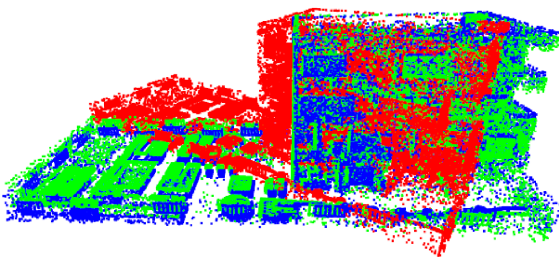


图 10 模型表面点云数据配准

Fig. 10 Registration of point cloud data on the model surface

接下来以构件的坐标点来代替构件, 以模型坐标点集 $(\mathbf{Pa}, \mathbf{Pb})$ 代替模型, 然后用模型旋转矩阵和构件坐标点集相乘, 得到配准之后的坐标。

如图 11 所示, 绿色的立方体为模型 $\mathbf{Ma}$ 的所有构件的坐标, 蓝色的立方体为模型 $\mathbf{Mb}$ 所有构件的坐标。

为了解决第②个问题, 本文利用 2 个模型之间构件的距离, 得出构件之间的位置相似度。所以在配准了模型构件的坐标之后, 需要计算模型坐标点集 $\mathbf{Pa}$ 中每个构件和模型坐标点集 $\mathbf{Pb}$ 中每个点之间的距离, 根据其距离大小计算位置相似度 $\mathbf{Ps}$ 。当距离大于阈值 α 时, 视为位置不匹配, 即位置相似度 $\mathbf{Ps}=0$; 当距离小于 α 时, 根据 2 个构件之间的距离, $\mathbf{Ps}$ 从 0 到 1 递增, 并得出位置相似度矩阵 $\mathbf{Ps}(\mathbf{Ma}, \mathbf{Mb})$ 式(5)。减少矩阵数据量的方式与几何相似度的方法相同, 不同类的构件之间的几何相似度直接判定为 0, 用稀疏矩阵来存储相似度, 从而减少矩阵数据量和计算量, 即

$$\mathbf{Ps}(\mathbf{Ma}, \mathbf{Mb}) = \begin{bmatrix} Ps_{11} & \cdots & Ps_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Ps_{i1} & \cdots & Ps_{ij} \end{bmatrix}_{i \times j} \quad (5)$$

其中, α 值的设定需要考虑, 当模型中的门窗发生了朝向的改变时, 门窗的中心点位置就会发生改变。所以本文 α 值的大小与墙体的厚度有关, 根据在多次实验结果显示, 当 α 值为模型中最厚的墙体厚度值时, 所得到的效果最好。

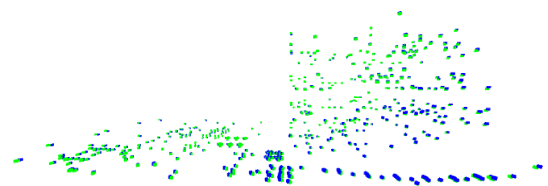


图 11 模型构件坐标位置配准图

Fig. 11 Coordinate registration of model components

2.4 构件匹配与属性对比

根据位置相似度和几何相似度叠加进行构件匹配, 取其每一个行向量中匹配度最高的构件对, 视为匹配构件, 其中如果有重复匹配的构件则取其相似度高的视为匹配, 其相似度低的则取其相似度较低于目前相似度的构件对, 视为匹配构件对, 以此迭代。其中不匹配的构件则视为新增/删除的构件, 即

$$\mathbf{G}(\mathbf{Gs}, \mathbf{Ps}) = (\mathbf{M}, \mathbf{A}, \mathbf{D}) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\}$ 为相匹配的构件集;

$A=\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ 为新增的构件集; $D=\{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$ 为删除的构件集; m_i 为一对匹配的构件; a_i 和 d_i 为单个的构件。

完成了模型构件的匹配,需要对比匹配构件之间的属性信息。BIM模型的属性信息结构图如图12所示,其展示了模型及构件的属性信息的构成,每一个构件包括有若干个属性类,每一个属性类又包括有若干个属性名,而其属性名对应唯一的属性值。属性信息的变化主要体现在属性值的变化,所以属性信息的对比过程从构件的属性类的匹配开始,接下来匹配属性名称,最后对属性值进行对比。

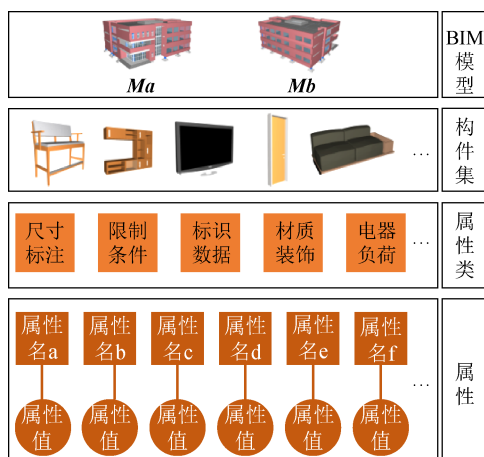


图12 模型及其构件的属性组成

Fig. 12 Attribute composition of the model and its components

在属性信息的比较中,首先将所有构件的所有属性类和属性处理成树状图,接下来在匹配的树之间进行根结点的子节点匹配,也就是属性类的匹配。对于未匹配的属性类节点视为新增/删除的节点,其子节点也视为新增/删除的节点。对于匹配的属性类节点,继续进行其子节点属性名称的匹配,未匹配的属性节点视为新增/删除的属性。对于匹配的属性名称节点,继续比较其唯一的子节点——属性值。属性信息的比较结果为两个相匹配构件之间的属性变化差异。

2.5 计算复杂度

设 n 和 $m(n \geq m)$ 分别为模型 Ma 和 Mb 中的构件数,每个模型分别有 $k, l(k \geq l)$ 种类型名称相似构件,其中每一种构件数量分别为 $\{n_1, n_2, n_3, \dots, n_b, \dots, n_k\}$, $\{m_1, m_2, m_3, \dots, m_i, \dots, m_l\}$ 。在比较构件相似度时,可在相似类型名称构件之间进行比较,所以每一种相似构件之间对比的时间为 $O(n_i, m_i)$,对比过程

中包括 $F1, F2$ 和位置相似度计算,所以对比过程总共的复杂度为 $O(\sum_{i=0}^l n_i m_i)$ 。在构件匹配阶段,

计算复杂度为 $O(n)$ 。考虑最不利的情况,即所有构件为同一类型时,对比过程计算复杂度上限为 $O(n^2)$ 。

3 对比结果可视化

完成了整个BIM模型对比的方法后,为了验证该方法在忽略构件ID的表现,本文通过Revit建模软件修改了BIM模型,测试整个方法,并且通过小红砖平台^[9]和WebGL将对对比结果三维可视化^[19-20]。该BIM模型为某高级住所模型,修改前模型大小为9.27 M,构件数量为606。修改后模型大小为9.92 M,构件数量为614。构件类型数量都为9。2个模型构造形状分布时间分别为931 s, 985 s。模型对比时间为53.04 s。识别准确率为603/614,其中未识别构件为分布集中且密集的围栏小构件,其形状相同,位置相近,导致识别错误。

对比结果如图13所示,黄色的构件表示修改的构件,红色的构件为删除的构件,绿色的构件为新增的构件。

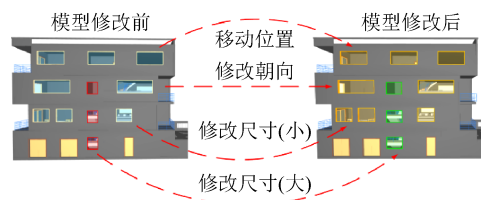


图13 模型窗户重新放置并修改

Fig. 13 Model window repositioned and modified

本文在将模型正面的所有窗户全部删除之后在原来窗户的地方放置了同样的窗户,增加了部分改变:①调整四层所有窗的位置,偏移大小小于 α 值;②将三层2个长窗翻转了朝向;③修改了二层3个窗户的尺寸(2个方向增加了10%);④中间3个小窗户大幅修改了尺寸(>50%)。

图13中所有窗户均改变了ID,通过图中对比结果可以看出,除了大幅修改尺寸的窗户之外,其余窗户皆被视为修改的窗户(为黄色),而大幅修改的窗户被视为新增/删除的构件。

为了检测本文方法在对比属性信息变化时的效果,修改了沙发构件的若干属性信息,并利用本文的方法进行对比。如图14所示,得出了2个

版本的沙发的属性信息比较结果,红色的为删除的属性、黄色的为修改的属性、绿色的为新增的属性。

三维可视化的方式不仅展示了模型对比的结果,而且着重突出了模型之间的差异,很大程度上方便了相关人员查看模型的变化情况。



图 14 模型俯视图及属性变化

Fig. 14 Model top view and attribute changes

4 总结与展望

本文针对 BIM 模型更替频繁,模型对比困难且对比结果不直观,模型对比严重依赖于构件 ID 等现状,提出了基于形状分布和位置配准的 BIM 模型对比方法。该方法提取构件形状分布,并结合位置信息进行构件匹配,最终得到构件匹配结果,并对比模型之间的差异。本文方法实现了 BIM 模型的自动化对比,使模型对比更加快速,对比结果更加准确;基于形状分布和位置信息的匹配方法完全消除了构件 ID 变化对模型对比的影响,使模型对比不再依赖构件 ID;基于 WebGL 的结果可视化展示,可直观展示模型版本之间改动的构件及其属性,方便相关各专业人员协同合作以及施工管理等。基于形状分布的方法可为相似构件推荐和构件聚类研究提供构件形状分布特征,对 BIM 领域的发展具有较深的意义和广泛的应用前景。

参考文献

- [1] National Institute of Building Science. National BIM Standard-United States version 3[EB/OL]. (2015-07-22) [2019-09-14]. <https://www.nationalbimstandard.org/buildingSMART-alliance-Releases-NBIMS-US-Version-3>.
- [2] 李铁纯, 王佳, 周小平. 基于 BIM 的建筑设备运维管理平台研究[J]. 暖通空调, 2017, 47(6): 29-32, 127. LI T C, WANG J, ZHOU X P. Operation and maintenance management platform of construction equipment based on BIM[J]. Journal of HV&AC, 2017, 47(6): 29-32, 127 (in Chinese).
- [3] 张恩浦, 王佳, 张颖琮, 等. 基于 BIM 的消防产品库平台构建及研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(4): 583-586. ZHANG E P, WANG J, ZHANG Y C, et al. Construction and research of fire product library platform based on BIM[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(4): 583-586 (in Chinese).
- [4] 姜韶华, 吴峥, 王娜, 等. OpenBIM 综述及其工程应用[J]. 图学学报, 2018, 39(6): 1139-1147. JIANG S H, WU Z, WANG N, et al. Review of OpenBIM and its engineering application[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(6): 1139-1147 (in Chinese).
- [5] LIPMAN R, PALMER M, PALACIOS S. Assessment of conformance and interoperability testing methods used for construction industry product models[J]. Automation in Construction, 2011, 20(4): 418-428.
- [6] GHANG L, JONGSUNG W, SUNGIL H, et al. Metrics for quantifying the similarities and differences between IFC files[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, 25(2): 172-181.
- [7] XIN S, YU-SHEN L, GE G, et al. IFCdiff: a content-based automatic comparison approach for IFC files[J]. Automation in Construction, 2018, 86: 53-68.
- [8] 广联达. BIMFACE-模型对比[EB/OL]. (2018-03-18) [2019-10-13]. <https://bimface.com/developer-guide/868>. GLODON. BIMFACE-Model comparison[EB/OL]. (2018-03-18) [2019-10-13]. <https://bimface.com/developer-guide/868> (in Chinese).
- [9] 盈嘉互联. 模型对比[EB/OL]. (2019-05-10) [2019-12-13]. <https://www.bos.xyz/>. Boswinner. Model Comparison[EB/OL]. (2019-05-10) [2019-10-13]. <https://www.bos.xyz/> (in Chinese).
- [10] AUTODESK. 比较模型两个版本的步骤[EB/OL]. (2016-09-17) [2019-10-13]. <http://help.autodesk.com/>

- view/NAV/2020/CHS/?guid=GUID-AFAF164A-834F-4BF8-BE20-733A98B56459.
- AUTODESK. Steps to compare two versions of a model[EB/OL]. (2016-09-17) [2019-10-13]. <http://help.autodesk.com/view/NAV/2020/CHS/?guid=GUID-AFAF164A-834F-4BF8-BE20-733A98B56459> (in Chinese).
- [11] ZHOU X P, ZHAO J C, WANG J, et al. Towards product-level parallel computing of large-scale building information modeling data using graph theory[J]. *Building and Environment*, 2019, 169: 106558.
- [12] 黄楠鑫, 王佳, 李智, 等. 基于 IFC 的室内地图模型构建研究[J]. *图学学报*, 2019, 40(1): 186-192.
- HUANG N X, WANG J, LI Z, et al. Research on the Construction of Indoor Map Model Based on IFC[J]. *Journal of Graphics*, 2019, 40(1): 186-192 (in Chinese).
- [13] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Matching 3D models with shape distributions[C]// *Proceedings International Conference on Shape Modeling and Applications*. New York: IEEE Press, 2001: 154-166.
- [14] 廖列法, 黎晨, 孟祥茂. 基于欧氏空间相似度的云模型协同过滤算法[J]. *计算机工程与科学*, 2015, 37(10): 1977-1982.
- LIAO L F, LI C, MENG X M. A cloud model based collaborative filtering recommendation algorithm using Euclidean distance similarity measurement[J]. *Computer Engineering and Science*, 2015, 37(10): 1977-1982 (in Chinese).
- [15] BENESTY J, CHEN J, HUANG Y, et al. "Pearson correlation coefficient" noise reduction in speech processing[M]. Heidelberg: Springer, 2009: 1-4.
- [16] CAMPBELL D, PETERSSON L. An adaptive data representation for robust point-set registration and merging[C]// *International Conference on Computer Vision*. Santiago. New York: IEEE, 2015: 4292-4300.
- [17] WEI G, RUSS T. FilterReg: robust and efficient probabilistic point-Set registration using Gaussian filter and twist parameterization[C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York: IEEE, 2019: 11095-11104.
- [18] JIAN B, VEMURI B C. Robust point set registration using gaussian mixture models[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2010, 33(8): 1633-1645.
- [19] ZHOU X P, WANG J, GUO M, et al. Cross-platform online visualization system for open BIM based on WebGL[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(20): 28575-28590.
- [20] ZHOU X, ZHAO J C, WANG J, et al. OutDet: an algorithm for extracting the outer surfaces of building information models for integration with geographic information systems[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(7): 1444-1470.