

基于轮廓关键点形状上下文描述的 BIM 模型版本对比方法

刘建秀^{1,2}, 苏文哲^{1,2}, 苏治东¹

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410140;
2. 湖南省 BIM 工程技术研究中心, 湖南 长沙 410140)

摘 要: 在工程全生命周期过程中, 需求、参与方、工况等因素的变化使得 BIM 模型变更频繁, 模型校审工作量巨大, 校审的基础是识别不同版本之间模型的差异。针对模型中的结构化信息, 可采用文本比较的方式。对于非结构化的几何信息, 提出了基于轮廓关键点和表面描述点进行形状上下文描述的方法。该方法首先通过计算获得模型的轮廓线, 其次采用轮廓线均匀采样和表面泊松盘均匀采样的方式获取关于模型的特征描述, 最后对模型统计特征进行定量比较。相较于目前主流的随机采样方法, 该方法不仅能通过较少的采样点获得对模型的稳定描述, 提高对比效率, 且对模型结构改变十分敏感, 同时也可以抵抗因曲面细分或简化带来的影响。本文方法在某水电工程的部分非标准化构件中进行实验验证, 在模型差异化对比方面取得了良好的效果。

关 键 词: 模型; 版本对比; 轮廓线; 关键点; 均匀采样

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2023051034

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2023)05-1034-07

A comparison method of BIM model based on the shape context description of contour key points

LIU Jian-xiu^{1,2}, SU Wen-zhe^{1,2}, SU Zhi-dong¹

(1. PowerChina Zhongnan Engineering Co. Ltd., Changsha Hunan 410140, China;

2. Hunan BIM Engineering Technology Research Center, Changsha Hunan 410140, China)

Abstract: Throughout the entire lifecycle of a project, changes in requirements, participants, and operating conditions often result in frequent modifications to BIM models. The workload for model review is significant, and the foundation of this review process lies in identifying the differences between different versions of the model. For structured information in the model, a text-based comparison approach could be utilized. In terms of unstructured geometric information, a method of shape context description based on contour key points and surface description points was proposed in the paper. Firstly, this method obtained the model contour line through calculation, and then collected the model feature descriptions through uniform sampling of contour lines and uniform sampling of surface Poisson disks. Finally, a quantitative comparison was conducted on the statistical feature of the model. Compared to the current mainstream random sampling methods, the proposed method not only provided a stable description of the model with fewer sampling points, thus improving the contrast efficiency, but it was also highly sensitive to changes in the model

收稿日期: 2023-02-23; 定稿日期: 2023-05-24

Received: 23 February, 2023; Finalized: 24 May, 2023

基金项目: 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2022GK4009); 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司A级科研项目(2-2021-04667)

Foundation items: Hunan Province High Tech Industry Science and Technology Innovation Leading Plan (2022GK4009); A-Level Scientific Research Project of Power China Zhongnan Engineering Co. Ltd. (2-2021-04667)

第一作者: 刘建秀(1986-), 女, 高级工程师, 博士。主要研究方向为 BIM 研究及数字引擎开发。E-mail: jxliu2014@163.com

First author: LIU Jian-xiu (1986-), senior engineer, Ph.D. Her main research interests cover BIM research and digital engine development.

E-mail: jxliu2014@163.com

structure. At the same time, it could resist the impact caused by curved surface subdivision or simplification. The proposed method was experimentally validated on some non-standard components of a hydropower project, demonstrating outstanding performance in terms of model differentiation comparison.

Keywords: model; version comparison; contour lines; key points; uniform sampling

建筑信息模型(building information modelling, BIM)是使用三维数字化技术对物理对象的信息进行可视化表达。BIM 中的信息包含描述物体形状的、可测量的几何信息和描述工程属性、固有外观等的非几何信息。众所周知, BIM 模型受行业、设计软件和供应商等因素的影响呈现多源异构的特征。在工程建管和运维等数据应用阶段, 因模型融合的需求, 一般采用网格来统一描述模型, 并在开放的环境如浏览器端、移动端等进行业务应用^[1]。

随着 BIM 技术的应用越来越广泛, 对模型的修改因需求、参与方、实际工况等的要求变得越来越频繁, 产生的版本也越来越多, 由此带来的模型校审工作量巨大。对修改之后的模型进行校审, 首先需要识别修改前后版本中的内容差异, 尤其是几何差异。目前模型几何差异识别主要通过人工观察的方式实现, 效率低且准确度不高。本文拟研究不同版本的模型中构件自动对比的方法, 以提高校审效率, 扩大以模型为基础的数据应用场景。

在现有的研究成果中, 模型对比技术主要分为 2 类: ①基于模型语义信息描述的对比^[2-3], 即将模型的几何和属性信息都用结构化的数据格式表示, 如基于 IFC 格式和 XDB 格式的模型对比, 模型以文本文件的形式存储, 因此可通过文件对比实现。该方式简单高效, 但要求模型的几何信息能够用统一的参数化定义表示, 适用于标准化程度高的民建领域。在水利水电、能源等土木工程领域, 非标构件居多, 构件的形体特征很难用参数化方式表述, 该方法呈现出较大的局限性。②基于模型的几何特征实现, 如基于几何相似性^[4-6]、拓扑相似性^[7-8]、透视投影、轮廓等, 思路是选择一种统计特征来描述模型, 常用的有拓扑结构或距离统计直方图, 主要应用在模型分类和识别上, 其特点是忽略同类模型的具体参数差异。在该类方法中, 形成对构件的稳定特征描述需要大量的采样点和较长的计算时间。因此, 从效率和目标上均无法适用于模型版本对比的场景。

本文基于模型的三角网格表示方式, 研究如何快速识别模型构件在不同版本中的几何和非几何信息的差异。其中非几何信息如工程属性、模型材质和颜色等均可以用结构化数据表达, 通过结构化数据对比即可实现。因此本文的研究重点在于同类模型构件的几何对比, 其流程如图 1 所示。

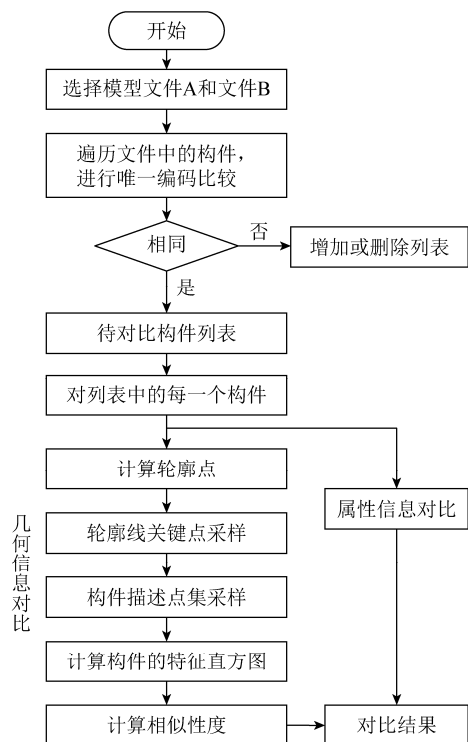


图1 本文方法的流程图

Fig. 1 Flow chart of the method in this paper

1 几何信息对比

模型版本更新一般是对模型进行局部变更, 如局部形变、修改、增删等。在识别模型变化的过程中, 由于采用三角网格表示模型, 需要区分模型的主观设计改变和同一模型因曲面细分或简化而发生的改变。

1.1 确定待对比构件

首先需要确定 2 个对比对象。在基于 BIM 的工程应用中, 模型是信息的载体, 可以由不同的设计软件产生, 并将随着工程进展进行版本迭代。为了屏蔽设计软件数据管理的差异, 保证模型在任何阶段、过程的信息都可追溯, 通常会在模型

创建之初,为每一个构件生成一个工程全生命周期内的唯一编码,编码规则遵循 BIM 分类与编码标准^[9-10]。本文以唯一编码为基础,将具有相同编码的 2 个构件列为待对比构件。除此之外,对于前后两版模型,通过构件编码比对可以确定增加或删除的模型。

1.2 特征定义

特征定义用来对模型的几何特征进行完全描述。在已有的研究中,特征定义的研究主要分为 2 类,一类是基于 3D 表面的数据配准^[11],如扩展高斯图^[12];另一类是基于形状的统计学特征,主要是对几何特征的离散直方图统计,因算法简单而备受青睐,如基于角度、距离、面积、体积等的直方图统计^[4-8,13-14]。流程是通过采样将连续对象离散化,选择合适的测量算法和度量方式进行统计分析,是目前关于三维模型对比的常规思路。结合本文快速识别同类构件细微差异的目标,拟采用关键点形状上下文描述^[15]的方法对模型进行定义,首先在构件的轮廓边上均匀采样,形成描述模型的关键特征点;其次,在模型表面用泊松盘均匀采样的方式采集关于形状的描述点;最后,围绕每个特征点构建其与描述点的形状上下文描述,并进行统计分析。下文对该方法进行详细介绍。

(1) 提取待对比模型构件的轮廓线 C 。选择轮廓线上均匀采样的关键点,记为关键点集 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_r\}$ 。

基于构件的三角网格表示法,文中通过判断三角面片的夹角来进行轮廓线提取。在描述构件的三角网格中,计算任意 2 个共边三角面的夹角 θ ,设夹角阈值 $\varphi \in [0, 1]$,当 2 个三角面的夹角 θ 满足

$$\frac{\pi}{2}(1-\varphi) \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}(1+\varphi) \quad (1)$$

时,取 2 个三角面的共有边线为轮廓线。其中 φ 值用来控制轮廓线的疏密。当 $\varphi=0$ 时,只接受 $\theta=90^\circ$ 生成的边线; $\varphi=0.5$ 时, θ 范围为 $45^\circ \sim 135^\circ$; $\varphi=1$ 时, θ 可取 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。以图 2 为例,介绍轮廓边的生成具体步骤:

步骤 1. 逐三角面提取构件的边信息,即边的端点坐标 p_{start} , p_{end} 和法向 n ,其中法向为当前三角面的法向,可得到 $E=\{e_i(p_{\text{start}}, p_{\text{end}}, n), i=1, \dots, t\}$, t 为构件中边的个数。图 2 中共有 4 个三角面片, 12 条边。

步骤 2. 对构件的顶点坐标按照 $X/Y/Z$ 的优先

级进行排序,存储每个顶点关联的边线。对图 2 中的 6 个顶点坐标,先按照 X 从小到大排序;若 X 值相等,按照 Y 从小到大排序;若 Y 值相等,则按照 Z 值排序。排序后的顶点为 $P_5, P_0, P_2, P_4, P_1, P_3$ 。对于每一个顶点,存储该顶点关联的边线,如顶点 P_5 的关联边线为 $P_5P_0, P_5P_1, P_5P_4, P_5P_1$ 。

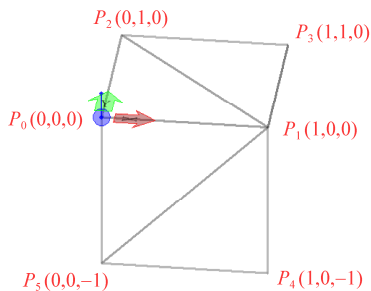


图 2 轮廓边提取示例

Fig. 2 Example of boundary edge extraction

步骤 3. 对每个顶点关联的边线进行边界判断。图 2 中顶点 P_5 不重复的边线 P_5P_0, P_5P_4 为边界边;重复的边线 P_5P_1 表示 2 个三角面片的共有边,计算两条边的法向夹角 θ , θ 值满足式(1)为轮廓边,去重后加入;不满足式(1)的,则被抛弃。在该例中, $\Delta P_5P_0P_1$ 和 $\Delta P_1P_4P_5$ 是共面三角形, $\theta=0$,因此该边被抛弃。

步骤 4. 对轮廓线进行拼接。经过步骤 3 处理后,本例由原来的 12 条边变成 7 条边,按照点的连接顺序对边进行排序,得到最终的轮廓线。图 3 是一个输水建筑物分流构件利用上述方法在不同 φ 值时获取的轮廓线。由于该方法是基于模型的三角网格表示法,因此可屏蔽不同软件参数化表达的差异。

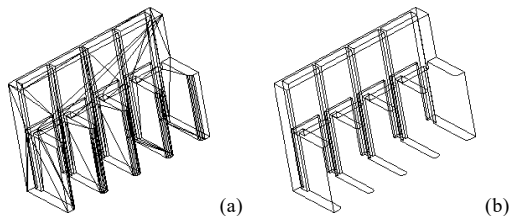


图 3 φ 为不同值时提取的边线

Fig. 3 BoundaryLine for different φ ((a) $\varphi=1$; (b) $\varphi=0.5$)

在获取到构件轮廓线之后,对其进行均匀采样可获取轮廓关键点。采样方式有 2 种:①固定采样间隔,对不同构件可获取同样精度的关键点数据,不受构件体积、形状的影响;②固定采样个数。选用轮廓线关键点可以保证构件特征描述稳定,对模型的形变比较敏感,且根据式(1)获取

的轮廓线疏密、关键点集的数目容易控制, 具有较高的自由度。

(2) 获取描述点集 D 。在构件表面进行均匀采样, 形成描述点集 $D=\{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$ 。

对模型表面进行采样获取描述点集 D 的方法, 比较常用的是在三角网格内进行随机采样^[4,6,16-17], 当采样数量足够多的时候, 可以完全描述模型。存在的问题是对于不同的构件, “足够多”的采样个数是不确定的, 算法的普适性难以保证。该方法存在的另一个问题是模型构件曲面细分或简化的过程并不是均匀的, 根据工程构件的特性, 细分或简化会发生在在曲面等需要更多细节描述的部位, 如图 4 所示。图 4(a)为原模型, 图 4(b)黑色线条为默认三角网格表示, 绿色为细分后的三角网格表示。而对于梁板柱等标准化构件, 都不受细分的影响。因此在三角面内进行采样的方式, 会造成构件局部采样点更密集, 得到的结果随机性更大。

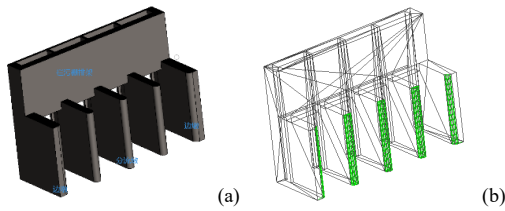


图 4 输水建筑物分流构件示意图((a)分流墩实体模型; (b)分流墩三角网格模型)

Fig. 4 Schematic diagram of components of water conveyance structure ((a) Solid model of diversion pier; (b) Triangulation model of diversion pier)

因此在考虑到采样个数和均匀性的影响之后, 本文采用泊松盘均匀采样^[18]的方式, 对模型表面进行均匀采样。三维网格模型上进行泊松盘采样的原理是针对每个采样点 p , 构造一个以 r 为半径的圆球, 圆球内的区域为采样点 p 的控制范围, 与其他已经确定的采样点进行碰撞检测, 如果控制范围内没有其他采样点, p 被接纳, 否则被拒绝。

在选择采样半径 r 时, 本文综合考虑采样个数(影响效率)和构件表面积(影响精度)的平衡, 以构件表面总和 S 除以最小三角面面积 s 的 $1/10$ 为参考采样个数 m , 然后求取采样半径。此处 $1/10$ 是一个可调节的比例系数, 用来保证每个三角网格都能被一定数目的采样点覆盖。在实际的工程中, 可考虑计算效率和构件类型的影响选择参数。

(3) 对构件进行特征描述。计算每一个关键点 c_i 与描述点集 D 内所有元素的对数距离

$L_{ij}=\{l_{ij}=\log\|c_i-d_j\|, j \in n\}$, 形成关于点 c_i 的上下文描述, 然后构造以距离为特征的直方图描述, 直方图构造方式为: 将集合 L_i 内的元素归一化为 $[0,1]$ 之间的数值, 设归一化之后每个元素为 L_{ij} , 将该区间等分为 M 个分区, 即 $\{(b_{k-1}, b_k], k \in [1, M]\}$, 则对于轮廓上的每一个关键点 c_i , 都可以形成一个统计直方图, 即

$$H_{c_i}^D(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b(L_{ij}, b_{k-1}, b_k) \quad (2)$$

其中,

$$b(L_{ij}, b_{k-1}, b_k) = \begin{cases} 1, & L_{ij} \in (b_{k-1}, b_k] \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (3)$$

其中, k 为直方图的第 k 个分区; n 为描述点集 D 内元素的个数, 式(3)表示集合 L_i 中的元素 L_{ij} 是否落在第 k 个分区内。用式(2)统计上下文距离落入每个直方图的比例, 则对于关键点集 C 内的所有关键点, 可以形成 r 个统计直方图, 即

$$H = [H_{c_1}^D, H_{c_2}^D, H_{c_3}^D, \dots, H_{c_r}^D] \quad (4)$$

其中, r 为关键点集内的元素个数; $H_{c_i}^D$ 如式(2)所示。

最后, 对式(4)进行统计获取特征描述。为了方便计算, 本文对所有关键点选用同样的直方图组距 M 。因此, 可分别计算出每个关键点的距离上下文, 得到描述构件的完整统计直方图, 即

$$\bar{H} = \left[\sum_{i=1}^r H_{c_i}^D(1), \sum_{i=1}^r H_{c_i}^D(2), \dots, \sum_{i=1}^r H_{c_i}^D(M) \right] \quad (5)$$

其中, $\sum_{i=1}^r H_{c_i}^D(k)$ 为第 k 个直方图分区的数值大小。

(4) 验证部分。基于上文对模型构件进行形状特征描述的步骤, 对图 4 所示的分流构件进行形状描述, 结果如图 5 所示。其中图 5(a)显示采用目前应用较多的随机采样方法所形成的形状分布, 在 600 万采样点时, 可以形成相对稳定的描述。图 5(b)中的上图为本文方法, 在采样个数为 10 万时, 即可形成对该构件的稳定描述。图 5(b)下图为相同采样个数(10 万)时, 曲面细分前后对该构件的特征描述, 可见细分前后描述是一致的。

图 6(a)左为一个倒角立方体, 版本更新后, 倒角的角度发生了细微变化, 其形状描述曲线如图 6(a)右; 图 6(b)左为开孔的墙体, 更新后, 孔的位置发生了改变。从图 6(b)右图中可看到特征曲线的变化。

综上, 本文对构件轮廓边和表面进行均匀采样的方法可以在较少采样个数下获得对构件的稳

定描述。在进行关键点采样时,一般选取式(1)中的夹角阈值 $\varphi=0.5$,当获取的轮廓线为空(构件形状为球形)时,此值建议设置为1。实验验证部分显示本文方法同样能够区分曲面细分等噪音影响和主观设计改变。

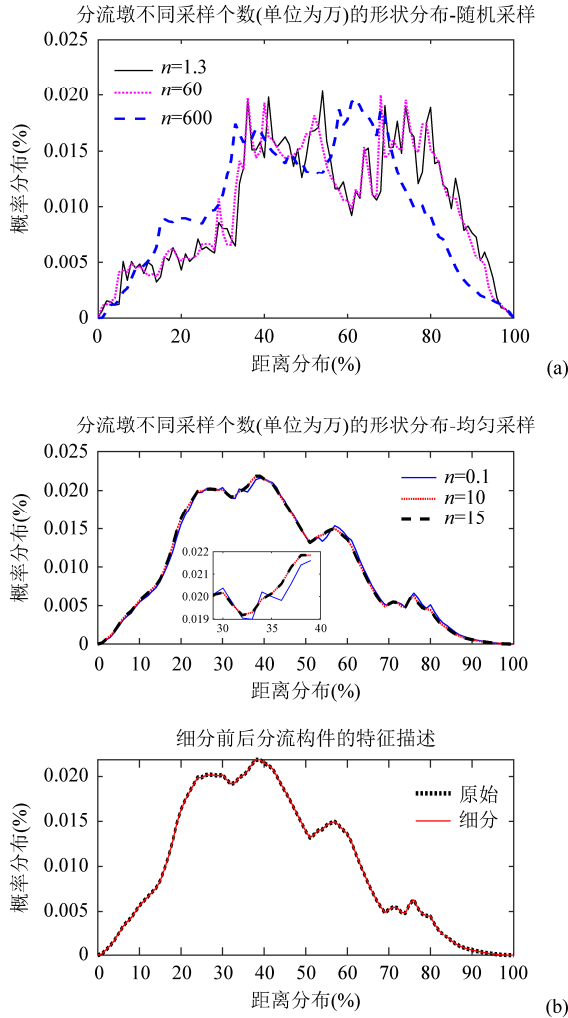


图5 分流构件形状分布((a)随机采样方式下采样个数对形状稳定性的影响;(b)本文中不同采样个数及曲面细分对形状分布的影响)

Fig. 5 Shape distribution of diversion models ((a) Impact of sampling number on shape stability under random sampling method; (b) The influence of different sampling numbers and surface subdivision on the shape distribution of components in this article)

1.3 模型对比

在1.2节中对模型比较是通过直方图描述进行直观观察。本节通过对2个直方图进行相似性度量进行比较。常用方法有欧式距离^[19]、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。本文选择欧式距离衡量2个直方图的距

离,通过设置比较阈值进行相似性结果判断。对于2个形状分布直方图 $H_A:\{h_1^A, h_2^A, h_3^A, \dots, h_n^A\}$ 和 $H_B:\{h_1^B, h_2^B, h_3^B, \dots, h_n^B\}$,形状距离为

$$e = \sqrt{\sum_{k=0}^n (h_k^A - h_k^B)^2} \quad (6)$$

其中, e 为2个形状直方图的误差, e 值越小,模型相似度越高,本文定义 $\theta=10^{-3}$ 为判断阈值,小于该阈值,则判定2个构件相同。对于图5(b)中的下图,用式(6)进行计算,相似性度量 $e=1.7 \times 10^{-4}$ 。

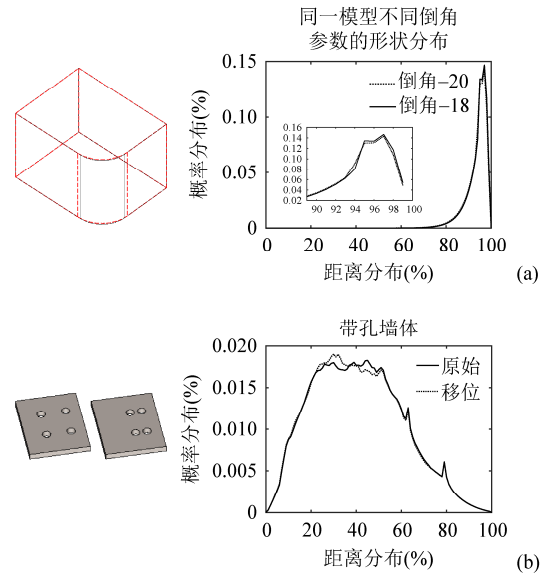


图6 模型的细微主观设计改变((a)同一模型不同倒角参数的形状分布;(b)同一墙体不同开孔位置的形状分布)

Fig. 6 The subtle subjective design change of the model ((a) Shape distribution of different chamfer parameters of the same model; (b) Shape distribution of different opening positions on the same wall)

在用上述方式进行模型对比时,存在的问题是,该方法对平移、旋转和缩放具有不变性,在模型分类中体现出充分的优势,但是对本文模型校审的应用场景,局部构件的位移和缩放等都需要进行识别。为了解决这个问题,本文对匹配结果为相等的2个模型构件A和B,计算每个构件的坐标范围 $P_{\max}$ 和 $P_{\min}$:

(1) 当2个构件的中心点距离 $d_c < \sigma$, σ 为计算误差,则未发生平移;

(2) 计算距离 $d = \text{dis}(P_{\max}, P_{\min})$ 的比率 d_A/d_B ,当 $|d_A/d_B - 1| < \sigma$,表示未发生缩放;

(3) 当向量 $\mathbf{v} = \overline{P_{\max} P_{\min}}$ 的夹角 $\alpha = \cos^{-1} \frac{\mathbf{v}_A \mathbf{v}_B}{\|\mathbf{v}_A\| \|\mathbf{v}_B\|}$
 $< \sigma$ 表示未发生旋转。

2 属性信息对比

模型属性信息包含模型的工程信息以及固有的材质或颜色信息等内容。一般用结构化的数据表达,以参数的形式附加在模型上,以分级分类的方式进行组织,如“库-类别-属性定义”。属性对比将考虑属性结构定义和属性值两方面的内容。属性信息按照存储方式区分,有文本文件存储和数据库存储2种。对于数据库存储的信息,本文采用从下向上的方式进行属性匹配,针对构件A的某一个属性字段,在构件B中查找相同的属性定义,即当前节点及其上级父节点直至根节点的定义都相同。对存在相同属性定义的2个属性,进行属性值匹配,标记匹配结果。

基于文本方式的比较,一种是类似国际性组织,如IAI组织(International Alliance for Interoperability)发布的开放式信息交换标准IFC,预先对模型数据的类型和逻辑进行标准化定义,用户按照IFC要求的格式写入文件。基于该方式描述的模型文本文件,有许多开源项目进行IFC解析或开发,如XBIM工具包、BIMServer等。还有一种广泛使用的方式是采用json类型的纯文本格式存储信息,适用于需要提供模型数据给第三方使用的情况,通过自定义程序进行逐行文本解析后存在数据表中,然后按照上文数据库信息比较的方式进行属性信息对比。

3 实验结果

本文选择水电工程中调压室及事故闸门室模型(图7)进行实验。对修改前后模型版本分别标记为A和B版,B版构件总数为40个,系统识别A和B版共有相同编码构件33个,B版独有构件7个,A版0个。对共有的33个构件进行模型对比。

实验中对比的2个构件,保持采样个数一致,避免形状描述的差异。通过合理控制关键点的采样间隔,对不同大小的构件进行等密度采样,不会因固定采样个数造成关键点不足。选择关键点采样个数时,计算轮廓线总长 L 与最短轮廓线 l 的比值,取采样个数为 $n=\max(L/l,1000)$ 。同理,进行描述点采样时,可以通过设置固定采样半径来优化描述点的分布。本文预置采样个数 $m=10$ 万个,采样半径 $r=\sqrt{\pi \times \min(S/m, S/10)}$,其中,

S 为构件表面积之和, s 为构件中最小三角面面积,该方法从理论上保证每个三角面都能被采样点覆盖。其相似性度量按照式(6)计算。

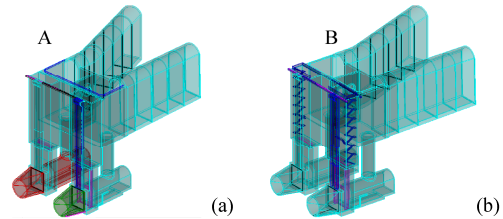


图7 调压室及事故闸门室模型版本对比((a)为修改前-A版;(b)修改后-B版,蓝色为有差异的部分)

Fig. 7 Comparison of surge chamber and emergency gate chamber with different versions ((a) The pre-A version; (b) The right is the post-B version, the blue represents the parts with differences)

经过计算,得到误差散点图如图8所示。为了方便查看,图上纵坐标用 $\log_{10}(e)$ 来显示误差值,且将构件按比较顺序标号。

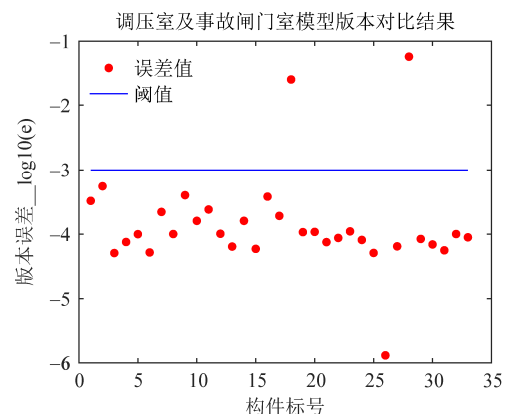


图8 相同构件的误差散点图

Fig. 8 Error scatter diagram of the same component

从图8中可见,第18号和28号构件误差大于阈值,将此构件独立显示,结果如图9所示。其中A版模型防浪墙上有钻孔;B版混凝土土建结构进行了加宽。

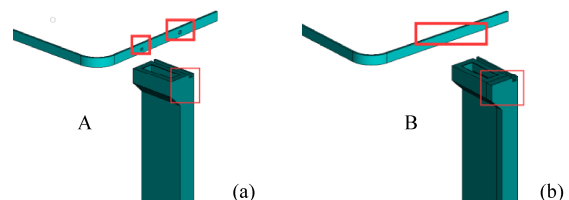


图9 构件的几何差异((a)原版本模型;(b)修改后模型)

Fig. 9 Geometric differences of the comparison model ((a) Original version model; (b) Modified model)

图7中模型的属性对比结果逐条存储在数据库中,将属性有变化的构件单独隔离显示,属性对比结果如图10所示。



属性名称	当前值	修改前
WBS编码	——	8049
长度	0	0
起始桩号	KL-005	0
终点桩号	KL-105	0
始端面积	0	0
末端面积	0	0
唯一编码	8049	——

图 10 属性对比结果(红色表示删除的, 绿色表示新增的, 黄色表示属性值有变化的)

Fig. 10 Attribute comparison results (red indicates deleted, green indicates added, and yellow indicates changes in attribute values)

4 结束语

本文针对 BIM 模型中的构件对比问题, 提出基于轮廓关键点进行形状上下文描述的对比方法。该方法提取模型的轮廓线并进行均匀采样获取关键点, 用泊松盘均匀采样获取模型表面的描述点集, 用来对关键点进行充分描述, 形成关于关键点的距离上下文描述的统计直方图, 通过直方图相似性度量进行模型对比。由文中实验结果可知, 基于该方法可以用较少的采样点获取准确的对比结果, 且方法对不同类别的模型具有适用性。方法存在的问题是, 对于纯圆形构件, 例如建筑物围墙装饰构件, 关键点会退化为三角网格的边, 造成关键点采样个数过多, 计算效率低。针对这种情况, 可以考虑结合类型判断来辅助选择特定区域内的采样个数或对轮廓边进行简化。

参考文献 (References)

- [1] 王文志. 三维模型轻量化技术研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学.
WANG W Z. Research and implementation of lightweight technology for 3D model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (in Chinese).
- [2] LEE G, WON J, HAM S, et al. Metrics for quantifying the similarities and differences between IFC files[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, 25(2): 172-181.
- [3] SHI X, LIU Y S, GAO G, et al. IFCdiff: a content-based automatic comparison approach for IFC files[J]. Automation in Construction, 2018, 86: 53-68.
- [4] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807-832.
- [5] 章志勇. 三维模型几何相似性比较的研究[D]. 杭州: 浙江大学.
ZHANG Z Y. Research on comparison of geometric similarity of 3D models[D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese).
- [6] 王佳, 吴磊, 周小平, 等. 基于构件形状分布和配准位置的 BIM 模型对比方法[J]. 图学学报, 2020, 41(3): 480-489.
- [7] WANG J, WU L, ZHOU X P, et al. Comparison method of BIM models based on component shape distribution and registration position[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(3): 480-489 (in Chinese).
- [8] BIASOTTI S, GIORGI D, SPAGNUOLO M, et al. Size functions for comparing 3D models[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(9): 2855-2873.
- [9] 王凌燕. 基于骨架线约束的非刚性三维模型匹配[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(6): 171-177.
WANG L Y. Non-rigid 3D models matching based on skeleton constraint[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(6): 171-177 (in Chinese).
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑信息模型分类和编码标准: GB/T 51269-2017[S]. 中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for classification and coding of building information model: GB/T 51269-2017[S]. China Construction Industry Press, 2018 (in Chinese).
- [11] 中国水利水电勘测设计协会. 水利水电工程信息模型分类和编码标准: T/CWHIDA0007-2020[S]. 中国水利水电出版社, 2020.
China Water Conservancy and Hydropower Investigation and Design Association. Standard for classification and coding of water conservancy and hydropower information model: T/CWHIDA0007-2020[S]. China Water&Power Press, 2020 (in Chinese).
- [12] CAMPBELL D, PETERSSON L. An adaptive data representation for robust point-set registration and merging[C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision. New York: IEEE Press, 2016: 4292-4300.
- [13] HORN B K P. Extended Gaussian images[J]. Proceedings of the IEEE, 1984, 72(12): 1671-1686.
- [14] ZOU K S, IP W H, WU C H, et al. A novel 3D model retrieval approach using combined shape distribution[J]. Multimedia Tools and Applications, 2014, 69(3): 799-818.
- [15] YANG S. Symbol recognition via statistical integration of pixel-level constraint histograms: a new descriptor[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(2): 278-281.
- [16] BELONGIE S, MALIK J, PUZICHA J. Shape matching and object recognition using shape contexts[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(4): 509-522.
- [17] 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, 2002: 154-166.
- [18] PREMACHANDRAN V, KAKARALA R. Perceptually motivated shape context which uses shape interiors[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(8): 2092-2102.
- [19] GENG B, ZHANG H J, WANG H, et al. Approximate Poisson disk sampling on mesh[J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(9): 092117:1-092117:12.
- [20] 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).