

基于建筑信息模型 (BIM) 的建筑空间功能分类方法

金超逸¹ 徐旻洋² 周向东¹

¹(复旦大学计算机科学技术学院 上海 200433)

²(上海现代建筑设计(集团)有限公司 上海 200041)

摘要 提出一种基于 BIM (Building Information Modeling) 数据的建筑空间功能分类方法。基于非监督学习技术对 BIM 建筑模型中的相关属性和拓扑信息进行挖掘;基于图的信息传播过程得到每个功能空间的特征表达;通过支持向量机 (SVM) 实现对建筑空间功能的自动分类。主要贡献是提出一种基于 IFC (Industry Foundation Class) 标准的 BIM 度量特性和拓扑结构特性的提取方法,并采用经典的分类器技术获得了较好的分类准确率。在真实的 BIM 数据集上进行了充分的实验,实验结果验证了方法的有效性。

关键词 图传播 无监督学习 分类 BIM 数据挖掘

中图分类号 TP3 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2018.11.038

A CLASSIFICATION METHOD UPON BUILDING SPACES BASED ON BIM

Jin Chaoyi¹ Xu Minyang² Zhou Xiangdong¹

¹(School of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

²(Shanghai Xian Dai Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200041, China)

Abstract We presented a method to classify building spaces based on building information modeling (BIM) data. An unsupervised learning technique was used to mine related attributes and topological information in BIM building model. The feature expression of each functional space was obtained on the basis of graph information propagation process. Support vector machine (SVM) was applied to realize automatic classification of building space functions. The main contribution was to propose a method for extracting BIM metrics and topology features based on industry foundation class (IFC) standard. And the classical classifier technology was adopted to get better classification accuracy. Experiments on real BIM datasets show that the proposed method is effective.

Keywords Graph propagation Unsupervised learning Classification BIM Data mining

0 引言

BIM 在工程建设领域获得了越来越多的重视。BIM 数据包含广泛、表达能力强,可以使很多原本分散的建筑数据集中在一个或几个建筑数据文件中,既可以进行可视化的展示,也可以进行查询、拆分、索引、分析^[1]。对 BIM 数据的运用和挖掘也开始越来越被研究者关注 and 重视,目标是通过机器学习和数据挖掘技术从 BIM 数据中获取对建筑过程有指导意义的知识,以优化建筑行业的流程和机制。同时,这方面的工

作也会对心理学、社会学、行为学习等其他相关学科产生帮助,使人们有机会更好地重新发现和理解与我们日常生活紧密相关的建筑的社会意义、心理意义和对人们行为的潜移默化而又深远的影响。

建筑中的一个重要分析对象是建筑空间。建筑空间是承载建筑功能的基本单位,人们对于建筑的使用、装潢、改造,都在空间中展开。不同的空间之间构成的联系往往以它们之间的位置、结构存在,这时,空间又以基本“细胞”的形式构成了一个由相对独立元素组成的有机体^[2]。通过学习这个有机体的结构,我们就能对建筑的功能有更好的把握。传统建筑模型只表达

了构成建筑实体的基本元素(如墙壁、楼板、门窗等),往往忽略了对它们围绕、分隔而无形之中形成的空间的表达。相比传统建筑模型,BIM 的空间建模能力更加强大。BIM 数据为我们更好地理解和挖掘建筑的空间功能提供了良好的条件^[3]。

机器学习是当前信息技术研究的热点之一,而且越来越多的学科和领域正在引入机器学习技术,对原本的理论结构进行检验或重新发现,以基于数据的实验来解决许多已面临的难题。在工程建设领域,建筑空间的功能设计是一个重要问题,往往反映了设计师的经验和水平。采用机器学习方法对建筑功能设计进行探索具有非常重要的研究与实践意义。本文基于 Space Syntax 理论对空间结构和功能的关系提出的基本原理,以空间为中心抽取 BIM 建模的 IFC (Industry Foundation Classes) 数据^[4],以图结构对建筑空间重新建模,以图结构上的机器学习方法为研究重点,针对当前研究的不足,采用图结构机器学习技术,对基于 IFC 标准的 BIM 度量特性和拓扑结构特性进行提取,并设计实现了一个对于建筑空间的功能进行自动分类的分类器。本文在真实工程建筑 BIM 数据上进行了充分的实验并验证了本方法的有效性。

1 相关工作

对于建筑空间的研究,需要针对建筑空间的特点建立相应的模型。文献[2]提出的 Space Syntax 理论是一个具有影响力的理论,它将建筑空间的结构建模成图型结构,用中心性和分布性及对称性和非对称性的区分两组简单的规则,及对空间结构的拓扑深度、轴性和凸多边形性的有关指标计算分析空间的功能。文献[5]将视线因素考虑在图的结构之内,把建筑空间进一步切割成视见体单元,将可视性图作为建筑空间的另一种建模,为建筑空间的建模提供另一个维度。文献[6]则分析了单纯以图的拓扑结构建模建筑空间的不足之处。文献[7]提出了将局部的度量特征和全局的拓扑特征结合在一起描述建筑空间的一种方法。文献[8]基于 BIM 提出了一种生成建筑空间体的指纹特征 (building fingerprint) 的方法,将 IFC 文件中的空间对象抽取成为连通性图和相邻性图两张图,作为描述建筑的一种不易重复的特征。文献[9]把 IFC 中的几何信息和语义信息抽取后,把这些信息离散化映射到一个平面栅格上,然后使用快速行进算法求出结构中的最短路径,作为一种基于 IFC 的 3D 室内空间路径规划方法。文献[10]将 SVM 运用在了建筑体的自动分类上。分类是基于建筑的结构,按照建筑单元的

紧密和共享程度分成分离式建筑、排屋、大厦等多种类型。他们利用 cityGML 的 3D 城市数据,不考虑建筑的外观,只关注建筑的构型,获得了大量粗粒度的城市建筑模型,并利用数据集中建筑类型集中分布的特点用一种无监督学习的方法对大量数据进行自动标注,解决了标注数据量少的问题。文献[11]提出了基于外观风格的 3D 模型的普遍分类方法。这种方法结合了美术学的知识,用比例、曲线和形状三种考量设计损失函数,通过将 3D 模型拆分的步骤比对部分件的相似度和显著性,最终学习出不同风格物体的分类依据。同时,他们还采用统计学的方法对大量来自非专业人士的选择题答案进行处理,以作为训练数据集的标注。他们的方法能对哥特式、巴洛克式、科林蒂安式等多种外形风格的建筑进行自动的分类。文献[12]在 BIM 上用简单的神经网络实现了基于 8 种人为特征的楼层图分类,并使用无监督的学习对 BIM 模型元素的几何属性进行异常检测。文献[13]提出了使用层次聚类对二维楼层图四种形状表达的聚类方法,以此对四种楼层图的形状表达方法进行了评估。

上述文献对于建筑空间的建模理论和自动化尝试各有所长,也各有局限;而将机器学习运用在建筑数据的处理中是研究发展的一个趋势。本文将无监督学习和有监督学习运用在建筑空间的建模自动化上,是第一个运用 BIM 数据对建筑空间设计进行自动学习的方法。它适用于“生成式设计”所产生的大量建筑设计,也可以把结论作为“生成式设计”的基础。

2 建筑空间图结构特征生成分类器

本文从 IFC 模型中抽取 IFCSPACE 对象,将它们及它们之间的关系用图结构表示,然后在图结构上进行参数传播,生成每个空间的多维特征。使用这些特征,本文使用带有 L1 正则化的支持向量机(SVM)实现对建筑空间基于功能的自动分类。

2.1 抽取 IFC 信息图型建模

IFC 是目前广为接受的 BIM 数据国际标准。如图 1 所示,IFC 中的数据以一种类似树型结构的形式存储,树结构中的每个节点都是一个对象,而这些对象是 IFC 以面向对象的思想定义的工业基础类的实体化。一个 IFC 文件以 IFCPROJECT 对象作为树的根节点,通过 IFC 中的关系类对象连接其他的对象类对象,展开建筑从整体到局部的定义。IFCSPACE 是 IFC 定义中最低一层的空间结构类,这一类的对象有 key-value 形式的属性对象用于描述它们的几何属性和物理属

性。除此之外,IFCSPACE 之间的边界关系也是与空间的功能关系密切的一项属性。IFC 中的空间边界对象连接了一个 IFCSPACE 和一个 IFCELEMENT 对象,后者一般是一个继承抽象父类 IFCELEMENT 的子类,如 IFCDOOR、IFCWALL 或 IFCVIRTUALELEMENT,表示构成边界的真实或虚拟的建筑元素。我们将 IFC 文件中的边界定义方式简化,把同一元素构成的两条边界合并,把这两个边界分别连接的空间作为两个节点,构成边界的元素作为两个节点之间的连边,对所有的 IFC 中的空间和边界都做如此的处理,就将 IFC 中的空间抽取成了图结构。根据图结构中节点和边的关系,我们抽取出了不同的子图,包括单一边元素类型构成的子图,如窗边界图;也包括混合边界关系构成的子图,如相邻性图和连通性图。图 2 和图 3 展示了 IFC 中相邻性关系和连通性关系的抽取。

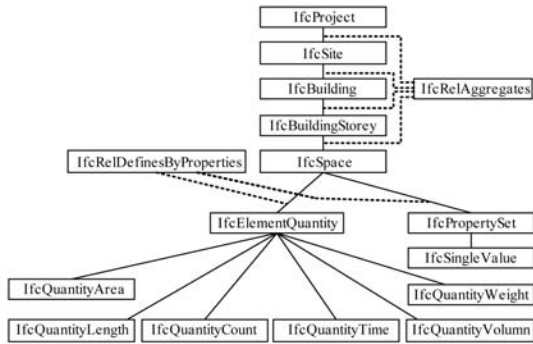


图 1 IFC 树状结构中描述 IFCSPACE 属性的方式

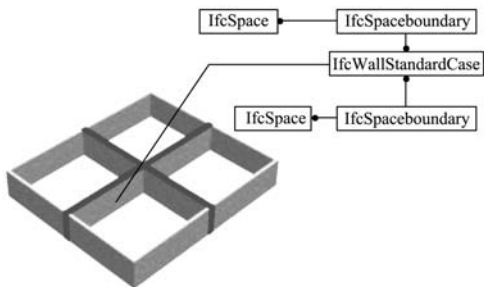


图 2 IFC 中相邻性关系的抽取

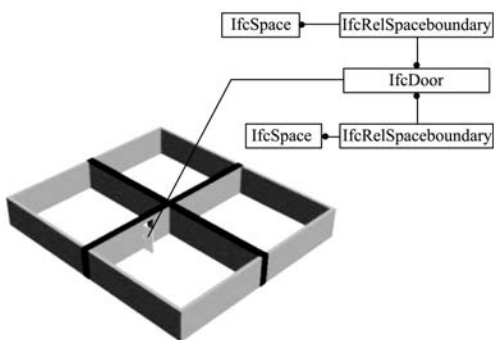


图 3 IFC 中连通性关系的抽取

2.2 参数传播

总结研究建筑空间功能形成的相关工作,我们把建筑空间的语义通过边界影响其他空间的功能定义为

一个在图结构上传播的过程。我们根据边界元素类型的不同抽取不同的子图,也为不同子图中的每条边都设计一个权重参数 d ,将每一条边,亦即传播路径中的每一个单步的衰减过程近似为一个线性的过程, $r = ds$,即接收空间接收到的参数量 r 为源空间发送出的参数量 s 乘以扩散系数 d 。整个建筑体空间传播的过程即为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{D}\mathbf{S} \quad (1)$$

\mathbf{R} 为接受参数量向量, \mathbf{S} 为源参数量向量, \mathbf{D} 为扩散函数。 \mathbf{D} 是我们需要从图结构中学习的参数。我们用一个损失函数 L 来描述 \mathbf{D} 的训练原理:

$$L = \sum D_{RA} \times D_{RR} \quad (2)$$

式中:

$$D_{RA} = 2d_{\min}(D_{MD-1})/(k-2) \quad (3)$$

$$D_{RR} = (1 + \sum_{ri} \prod_{e \in ri} d_e)/k \quad (4)$$

式中: D_{RA} 为 Diffusive Relative Asymmetry (扩散相对非对称性); D_{MD} 为 Diffusive Mean Depth (扩散平均深度),节点之间连边 e 的长度为该边扩散系数的倒数 $1/d_e$,计算节点到源点的路径深度时累加路径上每条边的长度,通过宽度优先遍历在图中求出每个节点的分布; D_{RR} 为 Diffusive Relative Ringiness (扩散相对成环性); k 为图中节点总数, r 为通过各个节点的图中环的个数, d_{\min} 为图中最小的边扩散系数。根据 Space Syntax 理论, D_{RA} 代表的是空间的融入性,而 D_{RR} 代表的是空间的控制性。我们的损失函数 L 基于强控制弱融入假设,即控制性较强的空间对人的流通有更强的限制,则会倾向于处在更不融入空间整体的地位。

基于 L 最小化的原理,我们根据宽度优先遍历的顺序,对于每条路径的有效传播长度进行有限的搜索,并辅以剪枝,使我们的算法能在较短的时间里计算出最后的参数值 \mathbf{D} 。在得出 \mathbf{D} 以确定每条路径的有效传播长度之后,我们从每个节点出发,将初始值为 1 的计数值传播到有效传播范围内的节点。每个节点按照不同的路径长度在不同的维度中接收传播来的计数,将相同维度中的计数相加,作为自己的特征维度。这一类传播为计数传播。我们还将从描述 IfcSpace 的 attributes 和 properties 中筛选出的四项主要几何物理属性作为每个空间节点的初始参数,引入参数传播过程。四项几何物理属性分别为空间的周长、面积、层高、楼层。传播的范围同样依照有效传播长度,而传播的接收则运用数学矩。接收函数如下:

$$M_i = Moment_i(s) \quad (5)$$

我们选择 1 到 6 作为矩的阶数。以数学矩的形式接收到的参数同样作为特征的维度,依照不同的传播

源点(即对应相应的传播距离)生成。这一类传播为属性传播。计数传播和属性传播一起形成了每个空间的多维向量结构特征,一共生成了 4 项简单特征和 193 项复杂特征,特征的总维度为 197 维。这些特征总结如表 1 和表 2 所示。

表 1 简单特征

空间面积	从 IfcPropertySingleValue 对象中抽取“area”
空间周长	从 IfcPropertySingleValue 对象中抽取“circumference”
空间层高	从 IfcPropertySingleValue 对象中抽取“room height”
空间楼层	从 IfcPropertySingleValue 对象中抽取“level”

表 2 复杂特征

子图分类	计数传播结果	属性传播结果
每种边界类型单独抽取子图	$N_{s,k} = \sum_{T_i=k, i \in B_s} 1$	$M_{s,k,f}^n = M_{T_i=k, i \in B_s}^n(F_{f,i})$
相邻性子图	$N_{aj_s} = \sum_{i \in B_s} 1$	$Ma_{aj_s,f}^n = M_{i \in B_s}^n(F_{f,i})$
连通性子图	$N_{ac_{s,d}} = \sum_{D_s^i=d} 1$	$Ma_{ac_{s,d},f}^n = M_{D_s^i=d}^n(F_{f,i})$

2.3 SVM 分类器

我们的分类器基于支持向量机(SVM)。支持向量机的本质是在向量空间中选取一个分类超平面,使正样本落在平面的一侧,负样本落在平面的另一侧,并使正负样本的边界构成的间隔距离最大。对于我们的建筑空间功能分类任务,我们的图结构传播算法生成的特征有很多不同的维度,这些维度代表了不同的语义,例如连通、采光、通风、隔音等不同人和物质的流通,我们知道这些因素对于空间的功能分布都有影响,却并不确切地知道这些影响各自有多大,在不同的情况下当这些因素导向的空间功能结果冲突时哪些因素居于主导地位。因此,使用 SVM 寻找一个特征之间的超平面,使我们可以更好地了解这些因素如何共同作用于建筑空间的功能分布。

SVM 的判别方程以斜率 ω 和截距 b 两个参数表示分类超平面,以此判别样本点 x 处在正样本区域还是负样本区域:

$$y_i(\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

并以样本点落在正负样本构成的间隔区域之外作为分类正确的限定条件:

$$f_{w,b} = \text{sign}(\langle w, x \rangle + b) \quad (7)$$

在此前提下最小化损失函数:

$$\tau(\omega) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 \quad (8)$$

在基本的 SVM 之上,我们加入了 L1-正则化。

L1-正则化以参数的绝对值作为惩罚项加在损失函数之上,以避免参数过于复杂导致模型过拟合。由于绝对值函数的边界存在不可导的“尖”边缘,在 L1-正则化中,相当数量的参数都会被惩罚到 0,因此 L1-正则化还具有特征选取的作用^[14]。

带有 L1-正则化项的 SVM 分类器损失函数为:

$$\tau(\omega) = \frac{C}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{n} \sum_{\omega} |\omega| \quad (9)$$

式中: C 为控制 L1-正则化项的系数, C 越大, L1-正则化的比重越小。我们使用 grid parameter optimization 对 C 进行等间距枚举,使最终 C 优化到分类器效果最佳的数值^[15]。

3 实验与结果分析

我们设计了全部生成特征与部分特征的分类实验对比,用分类准确率验证图传播特征提取过程对建筑功能结构语义信息的抽取效果。

3.1 数据集

我们从合作的单位获得了两座高层大楼的真实 BIM 数据。我们分别以建筑 A 和建筑 B 代表它们。建筑 A 高 20 层,并有两层地下层,一共包含 595 个空间。每个空间都有 longname 的数据,部分空间有 room type 和 room category 的数据;建筑 B 高 19 层,一共包含 1 507 个空间,每个空间都有 longname 数据,且标注较建筑 A 较为笼统,其中约 2/3 的空间的 longname 都为“办公室”。我们运用人工标注和关键词抽取,补全了建筑 A 中没有 room type 和 room category 数据的标签,使其中的 595 个空间主要归为 9 个大类;对建筑 B 中的 longname 数据进行关键词抽取和人工修正,使其中的 1 507 个空间主要归于 11 个大类。我们从建筑 A 的空间样本中选出 4 个样本数量最多的分类:公共机房、办公场所、卫生间和电梯间,从建筑 B 的空间样本中选出 5 个样本数量最多的分类:办公室、电梯、空气管道、卫生间和水管管道。

3.2 评价指标和对比方法

我们对建筑 A 和建筑 B 的主要 9 个大类进行依次的一对一分类实验。在每一次分类实验中,选中的大类的样本作为正样本,并在不是该大类的样本中随机选取同等数量的样本作为负样本。使用 k-fold 交叉验证对分类的效果进行评价。我们设计了几组实验,分别对不包含连通性和相邻性关系维度的特征、不包含属性传播维度的特征、完整维度的特征进行分类,以

验证我们特征维度生成算法的效果。

3.3 实验结果

实验结果表明,连通性和相邻性维度的特征为分类的准确性带来了很大的提高,而以数学矩接收的属性传播为分类准确性带来了进一步的提升。L1-正则化降低了不同随机组实验之间结果的波动性,使分类器更加鲁棒。完整特征并包含 L1-正则化项的分类器还具有很好的平衡性,因为它有最小的测试集正负样本之间结果之差;事实上,与其他三组实验相比,完整特征并包含 L1-正则化项的分类器一组在这项数据上要好多。实验中唯一的例外是建筑 A 中的电梯间类型的实验,在这一类分类的实验中,没有参数传播维度的特征一组的准确性超过了完整特征一组的准确性。这或许可以解释为数据样本过少的原因,因为这一组数据只有 53 个正样本,而完整特征的维度接近 200,很有可能使模型过拟合。事实上,这一组数据的实验中没有属性传播维度的特征更好的表现可能正是因为它的特征维度较少,事实上避免了过拟合。其他实验的结果都证明了我们的特征提取方法在分类任务上的意义。对建筑 A、B 的分类实验结果如图 4、图 5 所示。此外,我们还在建筑 A 和建筑 B 之间做了跨建筑空间分类实验。我们把建筑 A 中的办公场所和建筑 B 中的办公室视为一类,把建筑 A 中的卫生间和建筑 B 中的卫生间视为一类,将两座建筑的数据集合并,用同样的实验方法获得训练集和测试集的数据样本。分类的准确性如图 6 所示。图 7 则是某个办公型楼层分类效果的可视化展示。

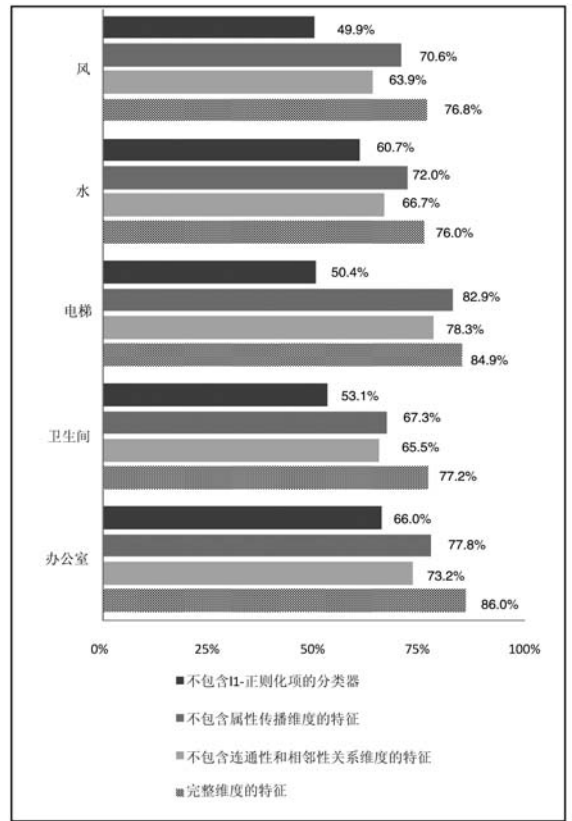


图 5 建筑 B 分类结果比较

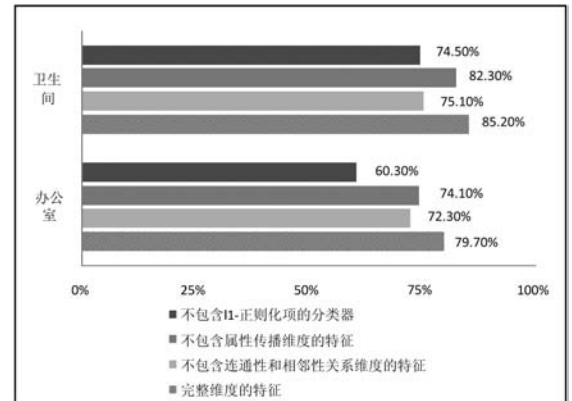


图 6 建筑 A、B 跨建筑分类结果比较

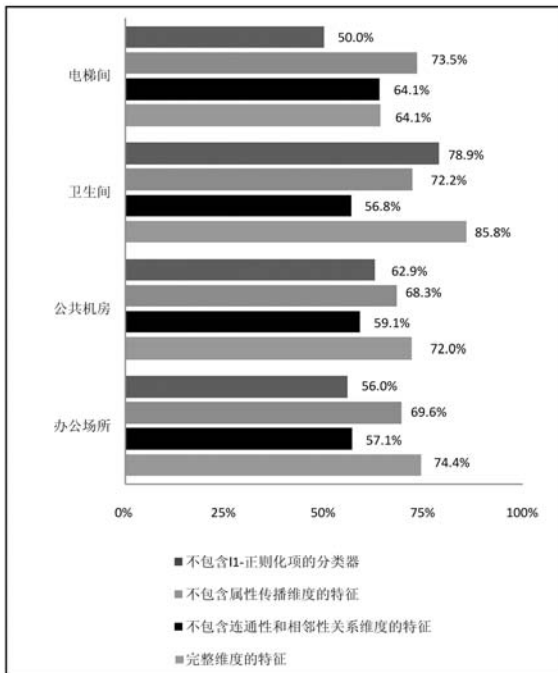


图 4 建筑 A 分类结果比较

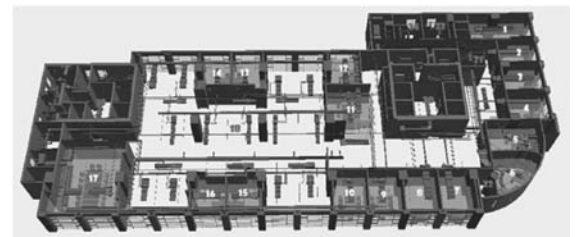


图 7 建筑 A 某楼层的分类结果可视化, 深色为办公场所,分类准确率为 81.25%

跨建筑的分类结果仍然证明了我们方法的效果。这些实验作为例子说明了分类系统的功能是根据标签将建筑模型自动分类,根据已经学习过的已知标签的数据样本,预测未知标签的数据样本。在学习了足够多的数据样本之后,我们的系统就能对新的建筑设计模型进行自动的分类,得到这个空间的功能结果以供

设计者和使用者参考。

4 结 语

本文基于 Space Syntax 理论对空间结构和功能的关系提出的基本原理,以 IFC 建筑模型表达中的空间对象 IFCSPACE 为中心抽取 BIM 建模的建筑数据,以图结构对建筑空间重新建模,以图结构上的机器学习方法为研究重点,针对当前研究的不足,提出了基于图结构机器学习的 BIM 数据挖掘方法,并将自动生成的特征用于建筑空间功能的自动分类,在真实的数据集上验证了特征抽取的效果。下一步将针对空间参数传播参数模型的训练过程做进一步的探索。

参 考 文 献

- [1] Azhar S, Nadeem A, Mok J Y N, et al. Building Information Modeling (BIM): A New Paradigm for Visual Interactive Modeling and Simulation for Construction Projects[C]//First International Conference on Construction in Developing Countries(ICCIDC-I), 2008: 435 - 446.
- [2] Hillier B, Hanson J. The Social Logic of Space[M]. Reprint edition. Cambridge. Cambridge University Press, 1989.
- [3] Pauwels P, Verstraeten R, Meeus W, et al. Industry Foundation Classes: a Space-Based Model Scheme? [C]//Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Proceedings of the 26th eCAADe, 2008: 117 - 124.
- [4] FroeseTM, YuKQ. Industry Foundation Class Modeling for Estimating and Scheduling [J]. Institute for Research in Construction, 1999, 8: 2825 - 2835.
- [5] Turner A, Doxa M, O'Sullivan D, et al. From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space[J]. Environment & Planning B Planning & Design, 2001, 28(1):103 - 121.
- [6] Ratti C. Space Syntax: Some Inconsistencies[J]. Environment and Planning B, 2004, 31(4): 487 - 499.
- [7] Kuipers B, Modayil J, Beeson P, et al. Local metrical and global topological maps in the hybrid spatial semantic hierarchy [C]//IEEE International Conference on Robotics and AutomationProceedings. ICRA'04, 2004: 4845 - 4851.
- [8] DaumS, Borrmann A, Langenhan C, et al. Automated Generation of Building Fingerprints Using a Spatio-semantic Query Language for Building Information Models [C]//European Conference on Product & Process Modelling. 2014.
- [9] Lin Y H, Liu Y S, Gao G, et al. The IFC-based path planning for 3D indoor spaces[J]. Advanced Engineering Informatics, 2013, 27(2):189 - 205.
- [10] Henn A, Römer C, Gröger G, et al. Automatic classification of building types in 3D city models [J]. Geoinformatica, 2012, 16(2):281 - 306.
- [11] Lun Z, Kalogerakis E, Sheffer A. Elements of Style: Learning Perceptual Shape Style Similarity [J]. ACM, 2015, 34(4): 84.
- [12] Krijnen T, Tamke M. Assessing Implicit Knowledge in BIM Models with Machine Learning [M]//Modelling Behaviour. Springer International Publishing, 2015:397 - 406.
- [13] Rodrigues E, Sousa-Rodrigues D, Sampayo M, et al. Clustering of architectural floor plans: A comparison of shape representations [J]. Automation in Construction, 2017, 80: 48 - 65.
- [14] Bi J, Bennett K, Embrechts M, et al. Dimensionality Reduction via Sparse Support Vector Machines. [J]. Journal of Machine Learning Research, 2003, 3(3):1229 - 1243.
- [15] HsuCW, ChangCC, LinCJ. A practical guide to support vector classification [R]. Technical report, Department of Computer Science, National Taiwan University. 2003.

(上接第 102 页)

使新系统的启用阻力大大减轻。通过一段时间运行,各项技术指标达到预期目的,管控系统、实时监控系统两大主线并行运行稳定、清晰。

系统经过一段时间运行后,下一步将新增远端实时监控、事后数据处理管理系统,进一步完善此系统,达到实时监控、数据管理、事后数据处理一体的综合系统,提升飞行数据的监控与处理能力。

参 考 文 献

- [1] Richter J. Windows 核心编程 [M]. 北京:机械工业出版社出版,2008.
- [2] 罗莉琴,詹祖桥. Windows 网络编程 [M] 北京:人民邮电出版社,2011.
- [3] 霍朝晖. 飞行试验振动参数遥测实时处理系统设计与实现 [J]. 西安电子科技大学, 2012,23(1):105 - 107.
- [4] 杨哲,王鹏,徐茜. 基于 RTR 的遥测数据实时处理软件的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016,24(1):165 - 167.
- [5] 黄晓波,杨哲. 多模式试飞实时监控系统设计 [J]. 现代电子技术, 2012,35(22):113 - 115.
- [6] 刘涛,李云芝,张璐. 基于 Measurement Studio 的试飞数据实时监控、存储、分析及回放平台设计 [J]. 电脑知识与技术, 2015,11(17):64 - 67.
- [7] 山寿,王鹏. 网络化遥测数据实时处理软件设计 [J]. 中国科技信息, 2016(11):77 - 79.
- [8] 刘升护,贾雨,杨哲. 一种冗余余遥测数据处理系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017(11):190 - 192.