



一种含室内空间结构的建筑物3D LOD概念模型与生成方法

史云飞, 刘克辉, 李向伟, 聂庆微, 吕春光, 张玲玲, 孙华生

引用本文:

史云飞, 刘克辉, 李向伟, 聂庆微, 吕春光, 张玲玲, 孙华生. 一种含室内空间结构的建筑物3D LOD概念模型与生成方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4): 561–569.

SHI Yunfei, LIU Kehui, LI Xiangwei, NIE Qingwei, LÜ Chunguang, ZHANG Lingling, SUN Huasheng. A 3D LOD Conceptual Model of Building with Indoor Spatial Structure and Its Generating Method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4): 561–569.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

建筑物白模多边形的自动合并

Automatic Aggregation of Building Footprint Polygons

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 12–18 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190345>

矢量居民地多边形多级图划分聚类方法

A Multi-level Graph Partition Clustering Method of Vector Residential Area Polygon

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 19–29 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190358>

自动绘制室内平面图的点云向量追踪算法

A Point Cloud Vector Tracing Algorithm for Automatic Drawing of Interior Plan

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1404–1411 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190258>

利用“计算区”进行建筑物短边结构识别和渐进式化简

Recognition and Progressive Simplification of Short-Edge Structure of Buildings Using Calculation Regions

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1782–1790 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200698>

利用细化空间分隔法的房间细部室内导航元素提取

Indoor Navigation Elements Extraction of Room Fineness Using Refining Space Separator Method

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 221–229 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190223>



一种含室内空间结构的建筑物 3D LOD 概念模型与生成方法

史云飞^{1,2,3} 刘克辉¹ 李向伟⁴ 聂庆微⁵ 吕春光³
张玲玲³ 孙华生³

1 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室,河北 石家庄,050021

2 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室,广东 深圳,518034

3 临沂大学资源环境学院,山东 临沂,276000

4 山东省煤田地质局物探测量队,山东 济南,250104

5 河北省地矿局资源环境监测仿真技术与应用创新团队,河北 石家庄,050080

摘要:针对现有建筑物多细节层次(level of detail, LOD)表达主要面向外部,很少涉及内部空间的问题,提出一种含室内空间结构的建筑物三维 LOD 概念模型。该模型分为 LOD0~LOD6 7 个 LOD,细节层次由建筑物的基底平面图、幢模型、无侧面楼层模型、楼层模型、户模型、房间模型到含门、窗等建筑语义的信息房间模型,空间细节逐次变细,丰富了建筑物室内空间 LOD 的表达理论。为构建这种 LOD 模型,提出基于胞腔复形链边界算子和上边界算子的 LOD 生成方法。该方法引入代数拓扑的胞腔、胞腔复形和复形链 3 个概念,利用胞腔和胞腔复形表达 LOD,并在 LOD6 的基础上,利用边界算子和上边界算子生成其他粗空间粒度 LOD 模型,为三维城市模型建筑物 LOD 构建提供一种新方法。

关键词:建筑物模型;室内空间;细节层次;多尺度表达;胞腔复形;胞腔复形链

中图分类号:P208

文献标志码:A

三维(three-dimensional, 3D)城市模型主要用于可视化^[1]。随着技术发展,3D 城市模型已经超出可视化应用范畴,在城市规划、建筑设计、房地产管理等领域得到广泛应用。3D 城市模型需要大容量数据存储以及强大计算能力来满足模型可视化渲染与分析的要求。由于大多数计算机的性能有限,因此有必要以不同的多细节层次(level of detail, LOD)来表达 3D 城市模型,以降低模型的复杂性和存储要求^[2],作为 3D 城市模型最重要的组成部分,建筑物同样需要 LOD 表达,但现有建筑物 LOD 表达主要针对外部特征,很少涉及室内。随着 3D 地理信息系统(geographic information system, GIS)、物联网、Wi-Fi 等技术快速发展,人们对室内空间应用需求增加,越来越多应用需要含室内空间结构的建筑物 3D 模型,构建包含室内空间结构的建筑物 LOD 模型已经

成为数字城市、智慧城市建设中不可避免的问题。

目前,建筑物 LOD 的研究主要集中在 LOD 定义和生成。在现有 3D GIS 数据标准中, CityGML 是建筑物 LOD 定义最完备的标准。该标准将建筑物划分为 LOD0~LOD4 5 个层级,但仅有 LOD4 表达室内对象^[3]。一些研究针对 CityGML 在建筑物 LOD 某些方面表达不够精细的问题,对其进行扩展,其中,文献[4]提出用于路线规划和可视化的室内 LOD;文献[5]在 CityGML 的 LOD 中添加相应层级室内 LOD 模型;文献[6]提出 LOD2+ 模型,该模型仅为 LOD2 添加对应的室内 LOD。此外,一些研究提出新的建筑物 LOD 划分方式,文献[7]将建筑物 LOD 细分为室外几何细节层次、室内几何细节层次和语义细节层次;文献[8]又进一步将语义细

收稿日期:2020-03-16

项目资助:河北省地质资源环境监测与保护重点实验室开放课题(JCYKT201910);自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金(KF-2018-03-034);国家自然科学基金(41601555);山东省自然科学基金(ZR2017BD018)。

第一作者:史云飞,博士,教授,主要从事 3D GIS、3D 地籍、智慧城市理论和应用研究。55734619@qq.com

通讯作者:刘克辉,硕士。13933041570@163.com

节层次细分为外部与内部。这些研究将建筑物的外壳、内部、几何、语义分开表达,再将其组合产生更多LOD层级,以满足不同领域多尺度表达的需求。文献[9]认为当前LOD的定义并不清晰,LOD的组成成分、动机、驱动因素等尚处于模糊状态,无法轻易地比较、分类和评价LOD。因此文献[9-11]从组成、驱动因素等方面,提出包含6个度量标准的LOD框架,并通过组合得出10个离散LOD示例。文献[10]提出一种新颖、与传统思维相反的LOD构建方法,该方法首先制作建筑部件离散LOD,然后在特定应用中,根据需求选择不同部件、不同细节的建筑部件LOD组合,生成定制的建筑物LOD,以增强LOD的自适应性,减少数据冗余。

建筑物LOD生成主要有简化和综合两类方法。简化是计算机图形学构建LOD的方法,具体有顶点聚类法^[12]、顶点删除法^[13]、多边形折叠法^[14]等,这些方法能够产生不同复杂度的建筑物3D模型,但没有顾及其特征和规则。综合是GIS生成建筑物LOD的方法,可在简化过程中保留建筑物特征。根据处理手段不同,综合可细分为基于结构特征、基于尺度空间、基于实例化和基于语义信息的方法^[2]。然而,这些方法主要针对建筑物外部特征,很少涉及室内。

随着LOD研究的深入,研究人员已经发现,由于涉及几何、语义、外观、属性等多个方面,要建立一个像二维地形图那样具有系列比例尺的通用3D建筑物LOD模型来满足城市不同应用需求是一件困难的事情^[9]。目前可行的方式是面向具体应用需求,建立特定的LOD。

室内空间无论是在几何、语义、获取技术还是形体上都与室外有很大差异。例如,在几何结构上,室内空间是一种特殊的空间对象,由水平和垂直平面相交构成,仅有少数房顶为倾斜平面或曲面。面与面之间具有明确的平行、垂直等几何约束关系,这些面将室内空间分割成房间,房间之间相互邻接且成群聚集在一起,称为3D群集对象^[15-16]。而建筑物外部几何构型则相对复杂,需要采用自由曲面建模。这些差异导致已有的室外或含室内LOD但划分较粗的规范(如CityGML)并不适合表达室内空间LOD,需要探索针对室内空间的LOD概念模型。在LOD生成方面,建筑物外部LOD的生成是对其外壳的3D自由曲面进行简化或综合,而群集对象LOD的构建则需要对相互叠置“粘连”的一组对象进行处

理。这些差异使得已有的简化或综合方法不能直接应用到含内部空间结构建筑物LOD的生成,需要探索专门针对此类对象的LOD生成方法。本文仅对室内空间LOD开展研究,提出了一种含室内空间结构的建筑物3D LOD概念模型与生成方法。

1 含室内空间结构建筑物LOD概念模型

1.1 室内空间特征分析

建筑物内部空间可划分为房间、户、楼层和幢,在空间粒度上逐次变粗。房间空间是由墙、板等建筑部件构成的功能空间(卧室、厨房等),抽象后形成一个3D群集对象;户空间是依附于墙、板等建筑部件的权属分界面分割成的所有权空间,抽象后也可形成3D群集对象;层空间同样也是一个3D群集对象。在这些空间对象中,粗粒度空间对象可分解为多个细粒度空间对象,如所有权空间可分解为一个或多个房间空间,楼层空间可分解为多个房间空间或所有权空间。反之,粗粒度空间对象可由多个细粒度空间对象合并而成,如户空间由隶属于同一个所有权的房间空间合并而成。基于该理论,可以仅构建粒度最细的房间级LOD,再以此为基础生成其他粒度的LOD模型。

根据开放地理空间信息联盟的室内空间信息标准IndoorGML,室内模型可分为以下两种:(1)厚墙模型,该模型中的建筑部件都具有一定的厚度,以建筑物信息模型为代表;(2)薄墙模型,该模型中所有建筑部件都用没有厚度的面片表示,只是在语义上将其区分为墙、板、门等,是一种轻量级模型。本文的研究对象是室内空间,而非建筑部件的结构、材料等信息,因此选用数据量较小的薄墙模型来表达室内空间。另外,墙、地板、天花板、门等建筑部件围成的空间虽然不一定封闭,但从空间利用和计算角度,需将其抽象为封闭对象。本文将不同粒度的空间对象都抽象为封闭多面体。

1.2 室内空间表达

抽象后的多面体相互邻接且群集在一起,形成对整个建筑物空间的完全剖分。这种空间适于采用代数拓扑的胞腔(cell)、胞腔复形(cell complex)等来表达,提供了将空间分解成简单区域的数学机制。本文通称使用汉字表示胞腔,带维数的胞腔,如 n 维胞腔表示为 n -cell,胞腔复形、

复形链的表示与之相同。胞腔的定义采用了递归的方式,一个 p -cell ($p \in N_+$) 由多个 $(p-1)$ -cell 构成,同时也是 $(p+1)$ -cell 的组成部分 ($p \geq 1$),而 0-cell 是构建其他维度胞腔的基元^[17-19]。复形是胞腔的集合,可使用不同维度的胞腔表达对象及其拓扑。复形也有维数,其维数由最大维数的胞腔决定,如果复形中维数最大的胞腔是 p -cell,则该复形定义为 p -complex。若使用 S_p ($0 \leq p \leq n$) 表示 p -cell 的集合, n -complex K 可定义为由 $n+1$ 个有限集 $S_0, S_1, S_2 \cdots S_n$ 和对应的 $n+1$ 个代数边界操作 ∂_p ($0 \leq p \leq n$) 的集合。 K 中胞腔需要满足两个特性:(1) 每个 p -cell c_p 的边界是 K 中有限个 $(p-1)$ -cell 的并集;(2) K 中任意两个胞腔 c^i, c^j 的交集要么为 K 中一个唯一的胞腔,要么为空^[17]。

在给定 $S_0, S_1, S_2 \cdots S_n$ 集合基础上,复形使用面-共面关系捕获复形中所有关联关系。对于一个 p -cell c_p ($c_p \in K$),组成其边界的 $(p-1)$ -cell 称为 c_p 的面,同时 p -cell 又是 $(p+1)$ -cell 的边界,称 $(p+1)$ -cell 是 c_p 的共面。因此, c_p 的共面是以 c_p 为面的 $(p+1)$ -cell。图 1 是一个 3-complex 的示例,由 2 个 3-cell、11 个 2-cell、20 个 1-cell 和 12 个 0-cell 组成。从图 1 可以看出, n -complex 是 n 维及其以下所有维胞腔的集合。

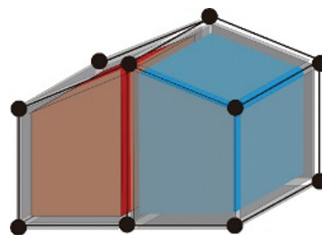


图 1 三维复形示例

Fig.1 Example of 3-complex

由于室内空间需要定向,因此需要有向胞腔。有向胞腔是一个二元组 $c=(u, o)$,其中, u 表示一个非定向的 p -cell, $o \in \{1, -1\}$ 。若用 $\sigma(c^i, c^j)$ 表示有向 cell $c^i=(u^i, o^i)$ 和其一个面 $c^j=(u^j, o^j)$ 的定向关系,则 $\sigma(c^i, c^j)=o^i o^j$,取值为 1 或 -1。若 $\sigma(c^i, c^j)=1$,则胞腔 c^i, c^j 定向一致,否则不一致。定向关系定义了复形中 p -cell 和 $(p-1)$ -cell 之间的映射,具有严格的代数意义^[17],本文的胞腔都是有向胞腔。

1.3 室内空间 LOD 的概念模型

在引入胞腔、复形概念后,建筑物内一块空间可抽象为一个 3-cell,墙、楼板、门、窗可抽象为 2-cell,其交线可抽象为 1-cell,交点可抽象为 0-cell。本文定义含室内空间 LOD 的概念模型分为 LOD0~LOD6 7 个层级,如图 2 所示。

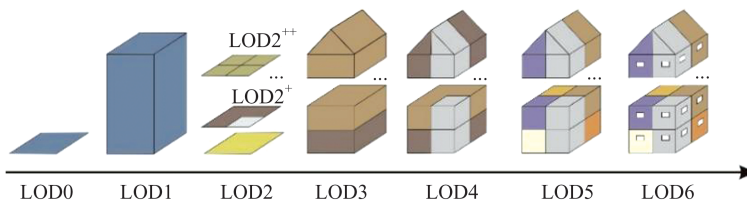


图 2 建筑物 LOD 概念模型

Fig.2 Conceptual Model of LOD for Buildings

LOD0 沿用 CityGML 的 LOD0,是二维到三维的过渡,用建筑物基底 (footprint) 表示。LOD1 沿用 CityGML 的 LOD1,其空间粒度是幢,主要用于以幢为单位的日照分析、爆炸分析、太阳辐射评估、城市规划等。LOD2 的设立主要考虑不需要楼层侧面但需要楼层平面结构的应用,由一组表示楼层结构的 3D 楼层平面图构成,用以描述建筑物各楼层的平面形状。LOD2 的每层仅有一个表示楼层的面,用一个 2-cell 表示。在不需要楼层间拓扑、体积等情况下,LOD2 可以代替 LOD3。为了扩展其应用范围,增加了 LOD2⁺ 和 LOD2⁺⁺ 两个变体。LOD2⁺ 的每层楼层平面图包含户结构,用于在非 3D 环境下代替 LOD4; LOD2⁺⁺ 的每层楼层平面图包含房间结构,用于

代替 LOD5。LOD3 的设立主要考虑一些需要楼层高度和侧面,但不需要楼层内部空间结构的应用,其空间粒度是楼层,每个楼层空间使用一个 3-cell 表示。LOD3 可用于建筑物评估、征税和大气污染影响分析等,例如层高低于 1.5 m 的楼层在荷兰不计算其面积。LOD4 的设立主要考虑 3D 地籍、3D 产权管理等三维不动产管理相关应用,也可用于以户为单位的人口估算、房地产经营、水电暖能耗估算等。LOD4 的空间粒度是户,每户空间使用一个 3-cell 表示。LOD5 的设立主要考虑一些不需要开口 (门、窗) 的应用,用于建筑物热辐射评估、噪声传播估计、墙立面太阳能估算。LOD5 的空间粒度是房间,每个房间空间使用一个 3-cell 表示,不区分建筑部件的语义。

LOD6是LOD5的精细化版,在LOD5基础上增加了门、窗开口信息,并区分了墙、楼板、门、窗4种建筑部件的语义。LOD6具有广泛的用途,可用于室内导航、应急管理、光线照射模拟、可视性分析、噪声传播估计等,绝大多数以房间为单位的应用都能满足。图3展示了LOD5与LOD6的对比,图3(a)为LOD5的一面墙,需要一个2-cell、4个1-cell和4个0-cell表示,不涉及语义;图3(b)为LOD6的一面墙,需要5个2-cell、14个1-cell和12个0-cell表示,并且2-cell要区分墙、窗语义。可见,LOD6比LOD5更精细。

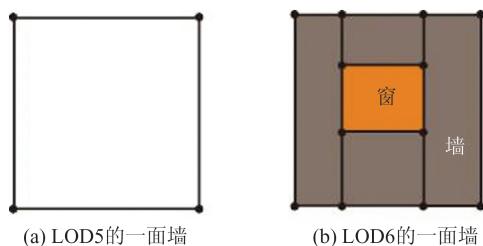


图3 LOD5与LOD6对比

Fig.3 Comparison Between LOD5 and LOD6

2 LOD生成方法

大比例尺地形图通过制图综合方式可以生成小比例尺地形图,同理,细粒度3D模型也可以生成粗粒度模型。本文最细粒度模型是LOD6,可以先生成LOD6,再由LOD6生成其他LOD。

本文采用胞腔理论表达LOD,每个LOD对应一个复形。用3-complex K 表示LOD6对应复形,其衍生的LOD对应的复形都是 K 的简化版本。在衍生过程中,不可避免涉及同维胞腔合并

问题,如LOD6生成LOD4,需要将前者表达房间的3-cell合并为后者表达户的3-cell。为此,提出两个LOD生成算子——边界算子和上边界算子,这两个算子只能作用到同维度胞腔上。3-complex是包含所有维数不大于3的胞腔集合,涉及4个维度胞腔。若直接在复形上使用这两个算子,难以描述算子具体作用的对象,例如 $\partial(K)$ 可表示求解 K 中某个维度胞腔或某个胞腔的边界,而 $\partial(c_3^1)$ 明显表示求解 c_3^1 的边界。因此,为了同时操作多个同维度胞腔,引入代数拓扑复形链(complex chain)概念。

2.1 复形链

复形链定义在胞腔剖分基础上,是拓扑空间构造同调群的中间环节^[20]。从形式上, p -维复形链(p -chain)是 p -cell的累加求和,可以将同维胞腔组织在一起,并将胞腔对应的属性(物理量)与胞腔关联起来。 p -chain的表达如下:

$$h_p(K, G) = \sum_i g_i c_p^i \quad (1)$$

式中, c_p^i 是 K 中的 p -cell;集合 G 是满足阿贝尔(abelian)群的代数结构^[18];系数 $g_i \in G$ 。 G 中元素代表 p -cell对应物理量,其类型可以是数值、向量、颜色等^[20], G 中的元素分配给 K 中 p -cell。当 G 是实数域时, p -chain构成一个向量空间,在该空间中 p -chain之间可以进行加法运算。图4展示了2-complex及其边界、上边界算子,图中包含弧线箭头的面表示2-cell,面中数字表示该2-cell的系数(属性),由2-cell形成的2-chain为:

$$h_2(K, G) = \sum_i g_i c_2^i = c_2^1 + c_2^2 + c_2^5 + 2c_2^3 + 2c_2^4 + 2c_2^8 + 3c_2^6 + 3c_2^7 \quad (2)$$

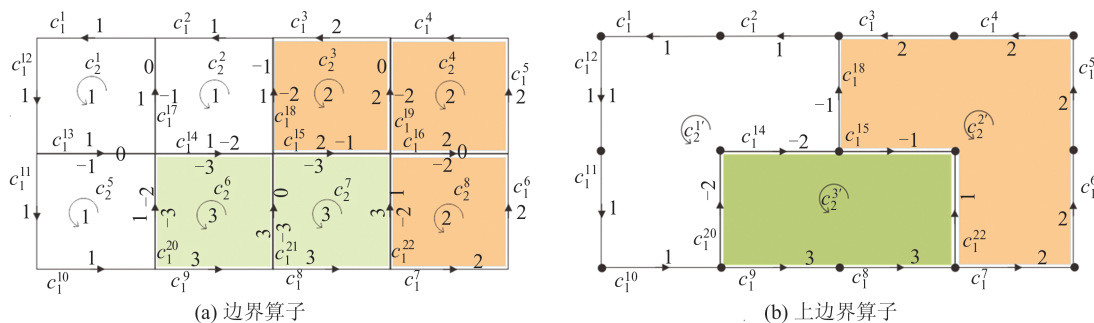


图4 2-complex及其边界、上边界算子

Fig.4 2-complex and Its Boundary and Co-boundary Operator

复形链可长可短,短链仅由一个胞腔构成,长链由复形中所有同维胞腔构成。最长链称为全链, p -维全链(p -full chain, p -FChain)用 $h_p^f(K, G)$ 表示。

2.2 LOD的算子

2.2.1 边界算子

边界算子最初定义在单纯形上。设 τ_p 是由 $p+1$ 个有序点 $(v_0, v_1, v_2 \cdots v_p)$ 组成的定向 p -维单

纯形($n>0$), $\partial(\cdot)$ 表示边界算子符号, 则定义^[21]:

$$\partial(\tau_p) = \sum_{k=0}^p (-1)^k \tau_{p-1,k} \quad (3)$$

式中, $\tau_{p-1,k}$ 是 τ_p 的第 k 个面, 即由 $(v_0, v_2 \cdots v_{k-1}, v_{k+1} \cdots v_p)$ 构成的 $(p-1)$ 维单纯形。

在此基础上, 通过将胞腔剖分为单纯形并利用 $\partial(\cdot)$ 运算符的可加性, 将边界算子推广到胞腔。进一步利用 $\partial_p(g\sigma) = g\partial_p(\sigma)$ 推广到初等链, 再利用链的可加性推广到所有链^[20]。将边界算子作用

$$\begin{aligned} \partial_2(h_2) &= \sum_i g_i \partial(c_2^i) = \partial(c_2^1 + c_2^2 + c_2^3 + 2c_2^4 + 2c_2^5 + 2c_2^6 + 3c_2^7 + 3c_2^8) = (c_1^1 + c_1^{12} + c_1^{13} + c_1^{17}) + \\ & (c_1^2 - c_1^{17} + c_1^{14} + c_1^{18}) + (-c_1^{13} + c_1^{11} + c_1^{10} + c_1^{20}) + (2c_1^3 - 2c_1^{18} + 2c_1^{15} + 2c_1^{19}) + (2c_1^4 - 2c_1^{19} + 2c_1^{16} + 2c_1^{21}) + \\ & (-2c_1^{16} - 2c_1^{22} + 2c_1^7 + 2c_1^6) + (-3c_1^{14} - 3c_1^{20} + 3c_1^9 + 3c_1^{21}) + (-3c_1^{15} - 3c_1^{21} + 3c_1^8 + 3c_1^{22}) = c_1^2 + c_1^1 + \\ & c_1^{12} + c_1^{11} + c_1^{10} - 2c_1^{20} - 2c_1^{14} - c_1^{18} + 2c_1^7 + 2c_1^6 + 2c_1^5 + 2c_1^4 + 2c_1^3 + 3c_1^9 + 3c_1^8 + c_1^{22} - c_1^{15} = h_1 \end{aligned} \quad (4)$$

生成的 h_1 是对该 2-chain 使用边界算子后的结果, 1-chain 中的 1-cell 如图 4(b) 所示。在边界算子作用到 p -chain 后, p -chain 中 p -cell 的系数将传递给 $(p-1)$ -cell, 抵消了被 p -cell 共用且系数相同的 $(p-1)$ -cell, 仅留下边界上或两侧系数不同的 $(p-1)$ -cell。

2.2.2 上边界算子

使用边界算子后, 原来 p -chain 中属性相同的 p -cell 之间的 $(p-1)$ -cell 被“拆除”, 仅留了边界上的 $(p-1)$ -cell。这些 $(p-1)$ -cell 虽然围成新 p -cell, 但并没有构成新 p -cell。图 4(b) 中 1-cell 虽然围成 3 个新 2-cell, 但并不在复形中, 此时需要将 $(p-1)$ -cell “缝合” 成 p -cell。本文使用上边界算子进行“缝合”, 上边界算子是构建高维胞腔的算子, 可将多个低维胞腔“缝合” 成高维胞腔, 使用

$$\partial_1(h_1) = \delta_1(\sum_i g_i c_1^i) = \sum_i g_i \delta_1(c_1^i) = h_1 = (c_1^1 + c_1^2 + c_1^{12} + c_1^{11} + c_1^{10} + c_1^{20} + c_1^{14} + c_1^{18}) + (2c_1^3 + 2c_1^4 + 2c_1^5 + 2c_1^6 + 2c_1^7 - 2c_1^{22} + 2c_1^{15} - 2c_1^{18}) + (3c_1^8 + 3c_1^9 + 3c_1^{22} - 3c_1^{15} - 3c_1^{14} - 3c_1^{20}) = c_2^1 + 2c_2^2 + 3c_2^3 = h_2 \quad (5)$$

h_2 的 3 个 2-cell 如图 4(b) 所示, 可见, 利用上边界算子可以将低维胞腔“缝合” 成高维胞腔。

2.3 LOD 生成

2.3.1 LOD6 生成

LOD 生成的实质是构建各层级 LOD 对应的复形, 由于室内空间绝大多数建筑部件(墙、板、门、窗)都是水平或垂直的, 仅有少数屋顶是倾斜平面或曲面。大多数楼层模型可采用“推拉”低维胞腔的方式生成高维胞腔, 如沿着 Z 轴方向“推拉”水平 1-cell(线段)生成垂直 2-cell(立面), 再采用手工方式建模房顶。文献[22-23]提出一种兼顾墙、门、窗等语义信息的室内 3D 模型重建方法, 该方法可以直接构建带有水平房顶建筑物的

p -chain, 则 $\partial_p(h_p) = \partial_p(\sum_i g_i c_p^i) = \sum_i g_i \partial_p(c_p^i)$,

$\partial_p(h_p) \in h_{p-1}(K)$, 其结果是 $(p-1)$ -chain。如图 4(a) 所示, 1-cell 上的箭头指示了 1-cell 的定向, 如果 1-cell c_1^i 和其共面 c_2^i 定向一致, 则 $\sigma(c_2^i, c_1^i) = 1$, 否则为 -1 ; 虚线箭头表示 2-cell 的系数通过边界算子传递到面(1-cell), 例如 c_1^1 从 c_2^1 获得值 1, c_1^{18} 从 c_2^2 和 c_2^3 分别获得值 1 和 -2 , 两者之和为 -1 。对图 4(a) 的 2-chain 使用边界算子后, 得到 1-chain h_1 , 计算过程如下:

复形链表达多个低维胞腔。

p -chain 的上边界算子 δ_p 表示 $h_p(K) \rightarrow h_{p+1}(K)$, 是 $(p+1)$ -chain 的边界算子 $\partial_{p+1}(\cdot)$ 的对偶。如果 $\gamma_p \in h_p$, $\kappa_{p+1} \in h_{p+1}$, 存在 $\langle \delta_p \gamma_p, h_{p+1} \rangle_{p+1} = \langle \gamma_p, \partial_{p+1} \kappa_{p+1} \rangle_p$ ^[20]。其中, $\langle \rangle$ 外面的下标表示链维数。

在一个 p -链上使用上边界算子, $\delta_p(h_p) = \delta_p(\sum_i g_i c_p^i) = \sum_i g_i \delta_p(c_p^i)$, $\delta_p(h_p) \in h_{p+1}(K)$ 其结果是一个 $(p+1)$ -chain。图 4(b) 是在 1-cell 上使用上边界算子的例子, 1-cell 的系数通过上边界算子传递给其共面(2-cell)。这些由 1-cell 构成的 1-chain 同式(4)。

运用上边界算子后得到 2-chain h_2 , 计算过程如下:

LOD6 复形。

假设已经创建了 LOD6 对应的 3-complex K , K 中 2-cell 可区分墙、板、门、窗 4 种建筑语义, 分别用数字 2、3、4、5 代表, 其构成的集合 $G_2 = \{2, 3, 4, 5\}$ 将作为 K 中 2-cell 的系数构建 2-chain。例如 $h^2 = 2c_2^1 + 2c_2^2 + 2c_2^3 + 2c_2^4 + 3c_2^5 + 3c_2^6 + 4c_2^7 + 5c_2^8$, 表示 4 面墙、2 个楼板、1 个门和 1 个窗。在 K 中, 2-cell 只能表示一种建筑部件, 即 2-chain 中的系数只能是 2、3、4、5 中的一个, K 中全体 2-cell 构成的 2-FChain 为:

$$h_2^i(K, G_2) = \sum_i g_2^i c_2^i = 2c_2^j + 3c_2^k + 4c_2^l + 5c_2^m \quad (6)$$

式中, $G_2 = \{2, 3, 4, 5\}$; $g_2^i \in G_2, j, k, m$ 均小于 K 中的 2-cell 的总量。

除了建筑部件语义外, K 中的 3-cell 有带户、层和幢 3 种语义, 用非零正整数表示 3-cell 所属的户、层和幢。此时一个 3-cell 可同时携带多种语义, 例如表示房间的 3-cell 在产权上属于张三, 位于第四幢建筑物的第三层楼, 以这 3 种语义为系数, 构建 3 个全链, 表示为:

$$h_3^f(K, G_3) = s \sum_i g^i c_3^i = s \begin{bmatrix} \sum_i g_p^i c_3^i \\ \sum_i g_s^i c_3^i \\ \sum_i g_b^i c_3^i \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} c_3^1 + c_3^2 + 2c_3^3 + 2c_3^4 + 3c_3^5 + 3c_3^6 + \dots + mc_3^n \\ c_3^1 + c_3^2 + c_3^3 + c_3^4 + 2c_3^5 + 2c_3^6 + \dots + jc_3^n \\ mc_3^1 + mc_3^2 + mc_3^3 + \dots + mc_3^n \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,

$$G_3 = \begin{cases} \{1, 2 \dots m\}, g_p^i \in G_3 \\ \{1, 2 \dots j\}, g_s^i \in G_3 \\ \{m\}, g_b^i \in G_3 \end{cases}$$

式中, s 是一个属性调节变量, 对应一个行向量 $[s_p, s_s, s_b]$, 3 个分量取 0 或 1, 且一个取 1 的情况下, 其他都取 0。通过调节 s 可以控制输出携带不同属性系数的 3-FChain。 s_p 取 1 时, $G_3 = \{1, 2 \dots m\}, g_p^i \in G_3$, 3-FChain 中的系数取表示户的整数; s_s 取 1 时, $G_3 = \{1, 2 \dots j\}, g_s^i \in G_3$, 3-FChain 中的系数取表示楼层的整数; s_b 取 1 时, $G_3 = \{m\}, g_b^i \in G_3$, 3-FChain 中的系数取表示幢的整数。

$$h_2(K, G_2) = g_3^1 \partial_3(c_3^1) + g_3^2 \partial_3(c_3^2) + \dots + g_3^n \partial_3(c_3^n) = g_3^1(c_2^1 + c_2^2 + \dots + c_2^j + c_2^k) + g_3^2(-c_2^j - c_2^k + \dots + c_2^l) + \dots + g_3^m(-c_2^m - c_2^l + \dots + c_2^q) = g_3^1 c_2^1 + g_3^1 c_2^2 + \dots + g_3^1 c_2^j + g_3^1 c_2^k - g_3^2 c_2^j - g_3^2 c_2^k + \dots + g_3^2 c_2^l + \dots - g_3^m c_2^m - g_3^m c_2^l + \dots + g_3^m c_2^q \quad (10)$$

式中, c_2^j, c_2^k 是 c_3^1 与 c_3^2 的公共面。若 $g_3^1 = g_3^2$, 即 c_3^1 与 c_3^2 属于同一户, 则 c_2^j, c_2^k 被抵消, 剩余所有以 g_3^1 、 g_3^2 为系数的 2-cell 将围成一个表示户的 3-cell。

图 5 展示了由 LOD6 创建 LOD4 的示例, 图 5(a) 是两个表示房间的 3-cell; 图 5(b) 是图 5(a) 展开后的 2-cell, 所有 2-cell 的定向都是从 3-cell 的外部

$$h_2(K, G_2) = 10(c_2^1 + c_2^2 + c_2^3 + c_2^7 + c_2^9 + c_2^{11}) + 10(c_2^4 + c_2^5 + c_2^6 + c_2^8 + c_2^{10} - c_2^{11}) = 10(c_2^1 + c_2^2 + c_2^3 + c_2^7 + c_2^9 + c_2^{11} + c_2^4 + c_2^5 + c_2^6 + c_2^8 + c_2^{10}) \quad (11)$$

在使用边界算子后, 3-chain 转换为 2-chain, 在该 2-chain 中, 具有相同系数的 2-cell 虽然围成表示户的 3-cell, 但还没有形成 3-cell, 需要将 2-chain 中表示一户的 2-cell 使用上边界算子“缝合”在一起, 形成 3-cell。首先取 2-chain 中系数相

2.3.2 LOD5 的生成

LOD5 与 LOD6 的区别在于前者不需要区分建筑物的墙、板、门和窗, 即 LOD5 不需要区分 2-cell 的语义。在构建 LOD5 时, 复制 LOD6 的复形 K , 并将 K 中 2-cell 的属性都改为 1。这样除 2-FChain 外, 其他 3 个维度的全链不变, 则 2-FChain 变为:

$$h_2^f(K, G) = \sum_i g_i c_2^i = c_2^1 + c_2^2 + \dots + c_2^n \quad (8)$$

2.3.3 LOD4 的生成

LOD4 表示户, 一户可对应一个或多个房间, 可将 LOD6 中属于同一户的房间合并生成 LOD4。复制 LOD6 的复形 K , 首先将 K 中 2-cell 的系数都改为 1, 清除 2-cell 的属性, 然后合并隶属于同一户的 3-cell。对于属于同一户的任意两个 3-cell c_3^1 与 c_3^2 , 若相邻, 则共用一个 2-cell c_2^1 。 c_2^1 与这两个 3-cell 相对定向相反, 即 $\sigma(c_3^1, c_2^1) = -\sigma(c_3^2, c_2^1)$ 。因此, 若对两个相邻且属于同一个户的 3-cell 使用边界算子, 则 3-cell 的系数将传递给 2-cell, 那些被 3-cell 共用且系数相同的 2-cell 将被抵消, 仅留下边界或两侧系数不同的 2-cell。根据该性质, 在 LOD6 基础上, 令式(7)中的 $s = [1, 0, 0]$, 则 LOD6 中的 3-FChain $h_3^f(K, G_3) = \sum_i g_p^i c_3^i$, 对该 3-FChain 使用边界算子得到:

$$\partial_3(h_3^f(K, G_3)) = \sum_i g_p^i \partial_3(c_3^i) = g_p^1 \partial_3(c_3^1) + g_p^2 \partial_3(c_3^2) + \dots + g_p^n \partial_3(c_3^n) \quad (9)$$

由此生成的 2-chain 为:

向内部。 $G_3 = \{10\}$, 即两个 3-cell 隶属于一户。图 5(a) 中的 3-cell 形成一个 3-chain, 即 $h_3(K, G_3) = 10c_3^1 + 10c_3^2$, 其中, $c_3^1 = \{c_2^1, c_2^2, c_2^3, c_2^7, c_2^9, c_2^{11}\}$, $c_3^2 = \{c_2^4, c_2^5, c_2^6, c_2^8, c_2^{10}, -c_2^{11}\}$ 。对该 3-chain 使用边界算子后, $\partial_3(h_3(K, G_3)) = \partial_3(c_3^1) + \partial_3(c_3^2)$, 生成的 2-chain (见图 5(c)) 为:

同的一组 2-cell, 构建第一个 3-cell c_3^1 。假定 c_3^1 与依次添加的 2-cell c_2^i 之间有唯一共用的 1-cell, c_2^1 是在 c_3^1 上添加的第一个面, 不妨设 c_3^1 与 c_2^1 相对定向一致, 即 $\sigma(c_3^1, c_2^1) = 1$ 。依次添加面, 随着 i 增大, 假设 c_2^{i+1} 与 c_2^i 之间共享 1-cell c_1^k ($k \geq 0$), 若

$\sigma(c_2^i, c_1^k) = 1$ 且 $\sigma(c_2^{i+1}, c_1^k) = -1$, 即相邻两个 c_2 相对于其共用的 1-cell 定向相反, 那么 c_3^1 与依次添加 c_2^i 和 c_2^{i+1} 都有相同的相对定向, 即 $\sigma(c_2^i, c_3^1) = \sigma(c_2^{i+1}, c_3^1)$, 这两个 2-cell 也具有相同的绝对定向; 若 $\sigma(c_2^i, c_1^k) = 1$ 且 $\sigma(c_2^{i+1}, c_1^k) = 1$, 即相邻的两个 2-cell 相对于其共用的 1-cell 定向相同, 那么 c_3^1 与 c_2^i 、 c_2^{i+1} 的相对定向则不同, 即 $\sigma(c_2^i, c_3^1) \neq \sigma(c_2^{i+1}, c_3^1)$, 这两个 c_2^i 的绝对定向也不同。在确定了相对定向后, 将这些 2-cell 连同定向存储一起构成了一个 3-cell $c_3^1 = \{c_2^1, -c_2^2, c_2^{i+1} \dots c_2^n\}$ 。其中, 2-cell 前面的“-”表示该 2-cell 与 3-cell 的定向相反。构建 3-cell 后, 取这一组 2-cell 的系数作为该 3-cell 的系数, 再取下一组相同系数的 2-cell 重复上述操作。当各组 2-cell 都“缝合”后, 生成的 3-cell 连同其系

数构成 LOD4 的 3-FChain。对图 5(c) 所示的 2-chain 应用上边界算子“缝合”后得到 3-chain h_3 (见图 5(d)), 计算如下:

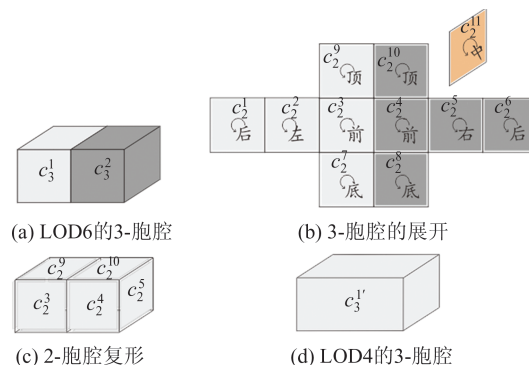


图 5 LOD4 的生成

Fig.5 Generation of LOD4

$$\delta_2(h_2) = \delta_2\left(\sum_i g_2 c_2^i\right) = 10\delta_2(c_2^1 + c_2^2 + c_2^3 + c_2^7 + c_2^9 + c_2^4 + c_2^5 + c_2^6 + c_2^8 + c_2^{10}) = 10c_3^1 = h_3 \quad (12)$$

2.3.4 LOD3 的构建

LOD3 表示楼层, 为了生成 LOD3, 需将 LOD6 中属于同一楼层的房间合并, 即合并标记相同楼层属性的 3-cell。复制 LOD6 的复形 K , 先将 K 中 2-cell 的系数都改为 1, 然后合并隶属于同一楼层的 3-cell。令式 (7) 中的 $s = [0, 1, 0]$, 则 LOD6 中的 3-FChain $h_3(K, G_3) = \sum_i g_3^i c_3^i$ 。对该 3-FChain 使用边界算子, 生成由楼层边界上的 2-cell 构成的 2-chain。再对生成的 2-chain 使用上边界算子, 将围成各楼层的 2-cell “缝合”成表示楼层空间的 3-cell。

2.3.5 LOD2 的构建

LOD2 是一组表示楼层结构的 3D 楼层平面图, 每层仅用一个面表达; LOD2⁺ 为包含户结构的 3D 楼层平面图; LOD2⁺⁺ 为包含房间结构的 3D 楼层平面图。LOD2 系列是 LOD3、LOD4 和 LOD5 (或 LOD6) 在非 3D 环境下的替代物, 可通过简化来获取 LOD2 系列。分别取这 3 个 LOD 的 2-FChain, 删除侧面的 2-cell, 剩余 2-cell 即是 LOD2 系列。

2.3.6 LOD1 的构建

LOD1 表示幢, 为生成 LOD1, 需要将 LOD6 中属于同一幢的房间合并, 即合并标记相同幢属性的 3-cell。同样复制 LOD6 的复形 K , 先将 K 中 2-cell 的系数都改为 1, 再合并隶属于同一幢的 3-cell。令式 (7) 中的 $s = [0, 0, 1]$, 则 LOD6 中的 3-FChain $h_3(K, G_3) = \sum_i g_3^i c_3^i$ 。对该 3-FChain 使用边界算子, 生成由幢边界上的 2-cell 构成的 2-chain。然

后, 再对生成的 2-chain 使用上边界算子, 将围成幢的 2-cell “缝合”成表示幢空间的 3-cell。

2.3.7 LOD0 的构建

LOD0 表示建筑物基底, 每幢建筑物仅有一个基底多边形。复制 LOD2 对应的 2-complex, 删除其他楼层的 2-complex, 仅保留第一层, 第一层的 2-complex 即为 LOD0 对应的 2-complex。

2.4 LOD 的映射

本文使用复形表达 LOD, 复形是代数拓扑的抽象概念。在应用时, 需要将其转换为具体的几何或拓扑数据模型。若将复形映射到欧氏空间 R^3 , 并为每个 0-cell 关联一个三维坐标, 则整个复形被“嵌入”到欧氏空间, 此时 0-cell 对应的顶点将整个复形“钉在”欧氏空间。由于室内空间是由水平和垂直平面相交构成, 仅有少数房顶为倾斜平面或曲面。在不考虑曲面情况下, 可以将其视作特殊的复形——线性胞腔复形。线性胞腔复形“嵌入”到欧氏空间后, 1-cell 是开直线段 (不含两侧端点), 2-cell 是开平面 (不含边界), 3-cell 是开多面体 (不含边界), 即广义棱柱体, 其侧面垂直, 顶面和底面是水平或倾斜平面。这种线性胞腔复形在“嵌入”前后形状完全一致。

将线性复形映射到欧氏空间后, 复形转换为一种普通的顾及内、外拓扑的多面体模型。该模型中的单个多面体按照顶点-边-面-体拓扑递进方式构造拓扑, 相邻多面体之间共享拓扑。

图 6(a) 是一个简单的建筑物, 由 4 个房间构成, 左侧是平顶, 右侧是斜顶; 图 6(b) 是图 6(a) 对应的 3-complex, 每个 3-cell 表达一个房间空间。

图6中的房顶 s_1 用2-cell c_2^1 表达,倾斜房顶 s_2 需要用 $c_2^2, c_2^3, c_2^4, c_2^5$ 4个2-cell表达,这种表达方式同样适用于Gable roof、Hip roof等类型的房顶。

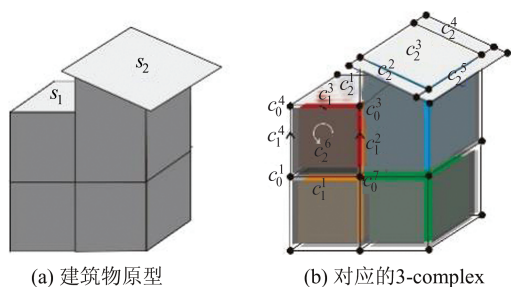


图6 建筑物与三维复形

Fig.6 Building and Its 3-complex

将复形映射到欧氏空间,映射后的复形转换为3D拓扑数据模型,可以采用点位字典存储0-cell对应顶点的坐标。边由顶点构成,并区分起点和终点,每条边存储其ID号以及起点、终点ID的引用。面由边围成,其边界是由边按照一定次序和方向组成的闭环。面具有方向,若边的方向与面的方向相反,则在该边的ID前添加负号,以示该边方向与面方向相反。每个面存储其ID号、边以及两侧的多面体。如图6(a)所示,2-cell $c_2^6 = \{-c_1^1, c_1^2, c_1^3, -c_1^4\}$ 。多面体是由多个面围成的封闭壳。多面体也有方向,若面方向与多面体方向相反,则在该面的ID前添加负号,以示该面方向与体方向相反。每个多面体存储其ID号以及构成它的面。

3 结 语

本文在理论层面上探讨建筑物LOD概念模型与生成方法,提出一种建筑物LOD的概念模型,并给出基于复形、复形链等代数拓扑理论的LOD生成方法。该LOD模型分为7个层级,从包含墙、门、窗等建筑部件语义的细粒度房间级3D模型到仅用一个多边形表达建筑物的粗粒度模型,覆盖了房间、户、楼层、无侧面楼层、幢等不同粒度的空间。这些LOD可以满足室内导航、3D不动产管理、建筑物征税和评估、日照分析等不同细节层次的应用。在LOD概念模型基础上,提出基于链的LOD生成方法。该方法在细粒度LOD上,利用链的边界和上边界算子分解和合并胞腔来生成粗粒度的LOD。

本文仅从理论上提出LOD的生成方法,但没有给出具体实现技术。在下一步工作中,将探索

复形到具体数据结构的转换方式,研究边界算子和上边界算子的实现算法,开发原型系统来创建不同细节层次的3D模型,实现建筑物的多尺度表达。

参 考 文 献

- [1] Biljecki F, Stoter J, Ledoux H, et al. Applications of 3D City Models: State of the Art Review [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(4): 2842-2889
- [2] Zhao Junqiao. Automatic Simplification Approach for the LODs of Complex 3D Building Models [D]. Wuhan: Wuhan University, 2012 (赵君峤. 复杂三维建筑物模型的多细节层次自动简化方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2012)
- [3] Gröger G, Kolbe T, Nagel C, et al. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard [S]. Open Geospatial Consortium, 2012
- [4] Hagedorn B, Trapp M, Glander T, et al. Towards an Indoor Level-of-Detail Model for Route Visualization [C]//The 10th International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware, Taipei, Taiwan, China, 2009
- [5] Abdul-Rahman A, Zlatanova S, Coors V. Innovations in 3D Geo Information Systems [M]. Heidelberg: Springer, 2006
- [6] Boeters R. Automatic Enhancement of CityGML LOD2 Models with Interiors and Its Usability for Net Internal Area Determination [D]. Delft: Delft University of Technology, 2013
- [7] Löwner M O, Benner J, Gröger G, et al. New Concepts for Structuring 3D City Models —An Extended Level of Detail Concept for CityGML Buildings [C]//The 13th International Conference Computational Science and Its Applications, Malaga, Spain, 2013
- [8] Benner J, Geiger A, Gröger G, et al. Enhanced LOD Concepts for Virtual 3D City Models [J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, 2 (W1): 51-61
- [9] Biljecki F, Ledoux H, Stoter J, et al. Formalisation of the Level of Detail in 3D City Modelling [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 48: 1-15
- [10] Tang L, Ying S, Li L, et al. An Application-Driven LOD Modeling Paradigm for 3D Building Models [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 161: 194-207
- [11] Biljecki F. Level of Detail in 3D City Models [D]. Delft: Delft University of Technology, 2017

- [12] Lindstrom P, Turk G. Image-Driven Simplification [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2000, 19(3): 204-241
- [13] Park I, Shirani S, Capson D W. Mesh Simplification Using an Area-Based Distortion Measure [J]. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 2006, 5(3): 309-329
- [14] van Oosterom P, Zlatanova S, Penninga F, et al. Advances in 3D Geoinformation Systems [M]. Heidelberg: Springer, 2008
- [15] Ying Shen, Chen Naibin, Li Weiyang, et al. Visualization Methods for the Coherent Set of 3D Building Property Units [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 81-88 (应申, 陈乃铤, 李威阳, 等. 三维房产群集对象可视化方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 81-88)
- [16] Ying S, Chen N B, Li W Y, et al. Distortion Visualization Techniques for 3D Coherent Sets: A Case Study of 3D Building Property Units [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 78: 101382
- [17] Palmer R S, Shapiro V. Chain Models of Physical Behavior for Engineering Analysis and Design [J]. *Research in Engineering Design*, 1993, 5(3): 161-184
- [18] Palmer R S. Chain Models and Finite Element Analysis: An Executable Chains Formulation of Plane Stress [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 1995, 12(7): 733-770
- [19] Egli R, Stewart N F. A Framework for System Specification Using Chains on Cell Complexes [J]. *Computer-Aided Design*, 2000, 32(7): 447-459
- [20] Wang Yongzhi. Research on the Unified Data Model of Three-Dimensional Representation and Analysis Calculation of Underground Spatial Objects Based on the Cell Complex Chain [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012 (王永志. 基于胞腔复形链的地下空间对象三维表达与分析计算统一数据模型研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2012)
- [21] Di Carlo A, Milicchio F, Paoluzzi A, et al. Chain-Based Representations for Solid and Physical Modeling [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(3): 454-467
- [22] Zhang Lingling, Shi Yunfei, Lü Chunguang, et al. A Method for Reconstructing Indoor Thin-Wall 3D Model Considering Topology [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(12): 141-146 (张玲玲, 史云飞, 吕春光, 等. 顾及拓扑的室内薄壁三维模型重建方法 [J]. 测绘科学, 2019, 44(12): 141-146)
- [23] Shi Yunfei, Bian Xishu, Zhang Yongxiang, et al. An Automatic Reconstruction Method for Indoor Three-Dimensional Model Considering Semantics [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2020, 8(1): 9-14 (史云飞, 卞西蜀, 张永翔, 等. 兼顾语义的室内 3 维模型自动重建方法 [J]. 导航定位学报, 2020, 8(1): 9-14)

A 3D LOD Conceptual Model of Building with Indoor Spatial Structure and Its Generating Method

SHI Yunfei^{1,2,3} LIU Kehui¹ LI Xiangwei⁴ NIE Qingwei⁵ LÜ Chunguang³
ZHANG Lingling³ SUN Huasheng³

1 Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang 050021, China

2 Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, MNR, Shenzhen 518034, China

3 School of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276000, China

4 Geophysical Survey Team of Shandong Coal Geology Bureau, Jinan 250104, China

5 Technical and Applied Innovation Team of Monitoring and Simulating Resource and Environment of Hebei Provincial Geological and Mining Bureau, Shijiazhuang 050080, China

Abstract: Objectives: Aiming at solving the problem that the representation of level of detail (LOD) for existing buildings is mainly external and seldom involves the internal space objects, a conceptual model of three-dimensional (3D) LOD for buildings with interior space structure is proposed. **Methods:** The conceptual model is divided into seven LOD levels: LOD0-LOD6, and the LOD consists of footprint, 3D box

(下转第 596 页)

road network, so a large amount of redundant distance information is eliminated. The data points and road network data that meet the pruning conditions around the query points are pruned. Therefore, the increase of road network scale has little impact on the time cost of the algorithm. **Conclusions:** The proposed algorithm can directly deal with the nearest neighbor query of mixed data in the road network environment. When the number of data objects and the scale of the road network are large, the algorithm has obvious advantages in central processing unit running time and input/output cost.

Key words: spatial database; road network; mixed data; nearest neighbor query; space filling curve

First author: ZHANG Liping, PhD, associate professor, specializes in data analysis and query. E-mail: lisongbeifen@163.com

Corresponding author: JIN Feihu, PhD, associate professor. E-mail: zhanglptg@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (61872105, 62072136); the National Key Research and Development Program of China (2020YFB1710200); the Science Fund Project of Heilongjiang Province (LH2020F047); Key Commissioned Projects of Higher Education and Teaching Reform of Heilongjiang Province (SJGZ20200145).

引文格式: ZHANG Liping, ZHANG Xiaojiao, JIN Feihu, et al. Nearest Neighbor Query Algorithm of Mixed Data in Road Network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4): 589–596. DOI: 10.13203/j.whugis20200075 (张丽平, 张晓娇, 金飞虎, 等. 路网环境下的混合数据最近邻查询算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4): 589–596. DOI: 10.13203/j.whugis20200075)

.....
(上接第 569 页)

model, 3D floor model without sides, 3D floor model, 3D room model to 3D room model with semantic information such as doors and windows. The spatial details become gradually refined, which enriches the theory of LOD for building interior space. In order to create LOD models, a LOD generation method based on boundary operator and co-boundary operator of cell complex chain is proposed. The method introduces three concepts of cell, cell complex and complex chain from algebraic topology, and LOD is expressed by cell and cell complex. On the basis of LOD6, boundary operator and co-boundary operator are used to generate other LOD models with coarse spatial granularity. **Results:** The research shows that the proposed LODs can meet the needs of outdoor and indoor multiple detail representation, and the boundary operator and the co-boundary operator can convert LOD6 into coarse LODs. **Conclusions:** The research provides a new method to create 3D LOD of buildings with interior space structure for 3D city model.

Key words: building model; interior space; level of detail; multi-scale representation; cell complex; cell complex chain

First author: SHI Yunfei, PhD, professor, specializes in the theories and application of 3D GIS, 3D cadastral and smart city. E-mail: 55734619@qq.com

Corresponding author: LIU Kehui, master. E-mail: 13933041570@163.com

Foundation support: The Open Fund of Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection (JCYKT201910); the Open Fund of Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, MNR (KF-2018-03-034); the National Natural Science Foundation of China (41601555); the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2017BD018).

引文格式: SHI Yunfei, LIU Kehui, LI Xiangwei, et al. A 3D LOD Conceptual Model of Building with Indoor Spatial Structure and Its Generating Method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4): 561–569, 596. DOI: 10.13203/j.whugis20200087 (史云飞, 刘克辉, 李向伟, 等. 一种含室内空间结构的建筑物 3D LOD 概念模型与生成方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4): 561–569, 596. DOI: 10.13203/j.whugis20200087)