

平行结构三维建筑化简中基于最短距离的面平移算法

葛磊¹ 武芳¹ 钱海忠¹ 王卓莹²

(1 信息工程大学测绘学院,郑州市陇海中路 66 号,450052)

(2 66240 部队,北京市石门路 258 号,100042)

摘要:从三维建筑的数据组织入手,提出了一种适于综合的数据结构,从平行结构建筑的正交化处理、平面结构的引入和特征信息的获取三个方面分析了建筑的结构化方法;根据可视化需求,将建筑 LOD 分为三个层次,在此基础上,以最短距离为指标实现了平行结构建筑的面平移化简算法。实验证明,该算法具有较高的效率和较好的通用性,对于平行结构建筑几何特征的化简具有良好的效果。

关键词:三维建筑综合;面平移算法;化简;LOD;最短距离

中图法分类号:P283.1; P208

目前,在三维地图的研究中,三维数字城市模型的建立是一个重要方向。随着三维城市模型的广泛应用,越来越高的复杂场景逼真表现要求与有限的系统软硬件性能和人力、物力等成本之间的矛盾日渐突出。而通过三维自动综合获取 LOD 模型是目前解决此问题的重要方法之一。

三维建筑综合从某种程度上可以看成二维居民地综合向三维领域的扩展。化简历来就是综合中最为重要的方法之一,其实现的质量直接影响着其他综合方法的实施,因此在三维综合的研究中,以化简方法作为起点具有较好的基础性作用。三维城市由多种形态各异的建筑所组成,其中平行结构是建筑结构形态的主体,因此,平行结构建筑自动综合的实现对三维建筑 LOD 模型的建立具有十分重要的意义^[1]。本文在探讨三维建筑数据模型的基础上,对基于最短距离的面平移化简算法进行了研究。

1 数据模型的建立

1.1 三维建筑数据的组织形式

3D Studio 是当前广泛使用的建模工具,本文以其交换格式 3ds 文件作为数据来源^[2]。

当前,对于建筑数据的组织大多是针对存储和可视化设计的,这种设计理念对于综合而言存在一定的局限性。针对综合中容易产生的拓扑关系的变化,这里提出一种利于综合的三角面结构,该三角面的结构直接存储了三角面的顶点坐标及顶点法向量等可视化渲染中所涉及的三角面的所有信息,将三角面完全独立出来,而对象层次的结构中也无需存储顶点、顶点法向量和纹理坐标这三个数组,以此结构为基础定义一种利于综合的三维建筑数据结构模型。在此结构中,综合中的一些基本化简操作只需在三角面的范畴内就能得以解决。

与传统的三维建筑数据结构相比,利于综合的数据结构具有以下特点:① 以三角面为基本图元进行操作,由于缺少点这一结构层次,对于涉及点、线等图元的交互操作相对困难,各层次拓扑结构不够清晰,对象交互性的实现相对困难。② 从存储空间上讲,本结构中同一个点分别存储在不同的三角面中,所存储的顶点及其对应的法向量数目有所增加。但从可视化的角度讲,由于只需要根据索引确定一次位置就能实现对一个三角面的渲染,可视化速度相对更快。③ 对于三维模型的综合而言,本结构有其独特的优势。在面删除方面,当一个顶点对应多个三角面时,一个面被删

除后,其对应的顶点是否应该删除很难判断,即使判断出哪些点需要删除,由于点删除而引起的点索引的变化也会使其相关三角面的表达发生混乱。本结构中点的变化发生在三角面的内部,解决了由于点的消失而引起点索引、法向量索引发生变化的问题,可以十分方便地对三角面进行平移、删除等操作,使化简过程变得轻松。在化简后的面重构方面,平行结构建筑的化简中,从表面上看,直接对点进行平移,可以轻松实现与其相关的所有面的平移,但移动后,平面的重新构造却很困难,而对于其相邻侧面上的三角面也会产生影响。采用本结构进行简化操作可以避免这些问题。

1.2 建筑模型的结构化

利于综合的数据结构为平行结构建筑的综合提供了基础,但仅靠初始的几何和纹理信息远远不能满足综合的需要,这就需要对建筑进行结构化处理,从初始信息中获取化简所需的信息。建筑模型的结构化包括正交化处理、引入平面结构和获取建筑特征信息等方面。

1.2.1 平行建筑的正交化处理

正交化处理是平行结构建筑面平移算法的基础,在建模过程中,一些细小的误差会使建筑结构发生微小倾斜,这种倾斜不影响建筑的视觉效果,但不能满足化简的要求,因此必须对其进行正交化处理。正交化处理的对象是建筑模型的三角面,根据三角面法向量的方向,从三个方向(x 、 y 、 z 轴)分别进行判断,如果法向量与某个方向基本平行,则将此面的顶点进行相应的细微调整,使整个模型完全正交化。

1.2.2 平面结构(Polygon)的引入

平面结构是指在平行结构的三维建筑中,以同一平面上的所有相邻三角面为基础,构造一个包含一个或多个多边形(轮廓内包含空洞)的平面轮廓。

将 Polygon 作为建筑模型结构化中不可或缺的一部分主要有两方面的原因:① 有利于平行结构建筑面平移化简算法的实现。以平面结构为基础进行面的平移相对直接移动三角面有着很大的优势。首先,直接移动三角面的平移算法难以实现。直接以三角面为基础进行平移至少存在以下两个缺点:同一平面上三角面的平移会对相邻平面的三角面的结构产生影响,容易使相邻平面上的三角面由于坐标的改变而发生空间关系的变化;两个反方向平面平移后合并为一个面时,如果没有 Polygon 结构的存在,将无法以三角面的形式对其进行表达。其次,在 Polygon 结构下,同一平面上的

所有点坐标的移动是同步的,化简过程相对移动三角面也要简单得多。② Polygon 结构是对建筑进行三角重剖分的基础。从综合减少建筑三角面数量的目的讲,平行结构建筑在使用面平移算法后会产生冗余的三角面,这就必须对其进行重剖分;即使对于原始建筑而言,由于建模过程中的各种原因,很难使三角面的数量达到表达所需的最小值,初始模型也有必要进行三角重剖分。

一个传统的建筑物对象通常是由多个平面(对于平行结构建筑,这些平面是水平或者竖直的)所组成的,对于常规的平面结构(水平或垂直),判断其是否共面较为简单。需要注意的是,一个平面包含多个共面多边形的情形。一个 Polygon 包含多个多边形分为两种情况:大多边形内包含小多边形,即包含空洞的情况(如除阳台外的楼房正面);多边形相互独立的情况(房屋突出的多个窗户共面)。其中,使用多边形相互独立的 Polygon 作为面平移算法的基础,能够使这些同一类型特征的简化一次完成,对于建筑整体形态的保持也较为出色,但某些共面且独立的多边形却不属于同一特征,面平移算法在对这种面的处理上会发生错误。因此,将这些独立的多边形分别作为单独面进行处理更为合理。

1.2.3 建筑特征信息的获取

建筑物的特征信息主要有三个部分:建筑的外接长方体、建筑各个平面(Polygon)的面积和建筑的表面积、体积。

对于单个建筑,其外接长方体的获取对于建筑在场景中初始位置的确定及建筑旋转中心的获取必不可少。多个建筑的综合中,外接长方体为判别建筑物是否邻近提供了一个量化指标,在建筑相交的判断中起着重要的作用,也为综合中建筑的合并操作提供了重要信息。获取对象的外接长方体过程简单,只需遍历所有平面的轮廓点,分别找出三个方向的最大值和最小值即可。

建筑各平面的面积可以通过平面内所有三角面的面积相加得到,也可以直接计算平面轮廓的面积。后一种计算方法虽然更具通用性,但在多边形轮廓发生嵌套关系时,需要对内外多边形方向进行判断和调整。这里采用前一种方法计算平面面积,将各个平面的面积相加就得到建筑体的表面积。

体积是三维建筑最重要的特征之一,在一定程度上决定了建筑的重要性程度,也是建筑化简过程及化简结果评价的重要指标。平行结构建筑体积的计算可按照以下步骤进行:① 计算所有与地面平行的 N 个平面的面积,并记录其法向量的

方向,这样就将建筑分割成 $N-1$ 个部分。② 各部分底面积的计算。将平面按照高程由低到高的顺序进行排列,计算出建筑表面各水平面的面积 A_i ,根据水平表面的面积顺序计算 $n-1$ 个建筑部分的底面积,计算公式为:

$$A_i = A_{i-1} \pm A_i (0 < i < n, A_0 = 0) \quad (1)$$

其中,公式的正负号由水平面表面的方向决定,面的法向量朝向地面时为正,朝上时为负。③ 遍历所有平面,并计算出所有相邻平面的高程差 $H_i (0 < i < n)$ 。④ 将各部分的体积相加,得到整个建

筑的体积,计算公式为 $V = \sum_{i=1}^{n-1} A_i H_i$ 。

2 算法设计与实现

2.1 算法的数据结构基础

基于对前面所述的两种数据结构的对比分析,采用利于综合的数据结构作为面平移算法的基础。此结构中,平面结构和对象结构最为关键。其中,平面结构的组织中使用 `vec3BorderArray` 以线段的形式存储边界,每两个相邻顶点表示一条线段。使用线段的形式记录边界的优势在于其结构更为灵活,能够满足边界构造和化简过程中边界轮廓调整的需要。

建筑对象的结构主要包括两部分的内容:用于可视化表达的三角面数组和用于建筑化简处理的 `Polygon` 数组。

2.2 LOD 等级的确定

根据不同的应用,建筑的 LOD 等级的划分标准很多^[3,4]。根据细节特征的详细程度,本文将平行结构独立建筑的 LOD 分为三个等级:原始细节模型 (LOD1)、包含主要特征的模型 (LOD2) 和只含有最重要特征的模型 (LOD3)。其中,不同 LOD 之间是以面之间最小距离的不同来划分的,距离阈值根据建筑不同方向的长度来确定。在独立建筑的化简中,将 LOD1 中两面距离小于此方向长度 $1/10$ 的面进行平移,得到 LOD2;将 LOD2 中两面距离小于此方向长度 $1/4$ 的面进行平移,得到 LOD3。在建筑群的化简中,不同 LOD 层次之间可根据方向的不同分别选择某一特定距离值作为阈值,这种划分标准虽然更为简单,但未考虑建筑不同方向尺寸的差异,会造成对不同建筑化简力度的不同。

2.3 算法中使用的主要算子

2.3.1 面平移

面平移是算法的核心,主要包括移动距离的

确定和所移动面的相邻平面的调整。图 1 表示了多边形面平移的三种形式,其中,图 1(a) 为法向量相同时面的平移,这种平移方式能同时处理建筑的凸起和凹陷两种特征;图 1(b) 和图 1(c) 分别为多边形法向量相反情况下处理两种不同特征的面平移示例。当两面的法向量方向相反时,有一种情况是不能进行平移的,如图 2 所示,在这种情况下,面平移之后,两面相交,即使强行将其合并,也无法确定多边形的法向量,在算法执行过程中,将其跳过即可。实际建筑模型中,这种情形并不常见。

面平移的目的是将两个平行的平面在移动后变为一个面,理想的方式是按照两个多边形的面积比例移动,这样可以最大程度上保持建筑物的体积,但这种移动方式在对建筑整体特征的表达上却有所欠缺,即使很小的特征也会对建筑整体形态造成影响。因此在平移时,如果较大面的面积大于小面面积的 3 倍,则保持大面不变,将小面移向大面;否则,将两个平面分别向对方方向移动二者距离的一半使其共面。这种平移方式往往能够得到较为理想的化简结果。

邻面的平移操作需要找出邻面边界中所有与平移面边界重合的线段,根据面平移的方向和距离改变线段端点的坐标,将线段长度与移动距离相乘得到此平面面积的变化,从而得到平移后邻面的面积。当有两个面需要平移时,则需分别对其邻面进行处理。对所有邻面的处理必须在面平移之前进行,因为如果先移动平面,然后处理邻面,则会由于平移面坐标的改变而无法找到邻面上所需要处理的点。

2.3.2 平移后的面调整

每一次平移都是由两个平面生成一个新平面的过程,新面是两个面内容的集合。新面需要与其他平面一同作为下一步面平移操作的一部分,因此必须对其进行调整,使该面与其他平面具有相同的结构。对于平移形成的新面及其邻面而言,由于点的位置变化会产生点的重合,如图 3 所示。这种情况下需要进行点的合并,否则不仅会造成数据冗余,在后续的平移操作中还有可能出现错误(当平移此面时,其邻面上与此点坐标相同的点会移动两次)。平移后的面调整按以下步骤进行:① 遍历移动平面的邻面,对每一个邻面,调整其边界数组,将相邻且共线的两条线段合并为一条(由于重合的两点可以看作特殊的共线线段,此操作同时可以消除重合点)。② 将平移的两个面中较小面的所有邻面索引添加到较大面的邻面

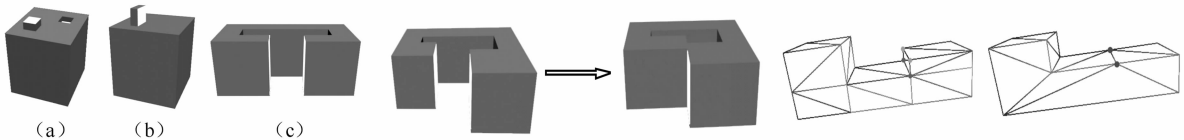


图 1 面平移的三种情形
Fig. 1 Three Cases of Facet Shift

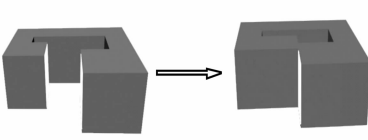


图 2 错误的面平移方式
Fig. 2 Error in Facet Shift

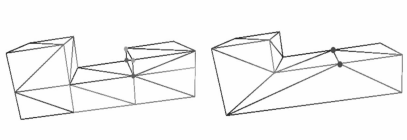


图 3 面平移所引起的点重合
Fig. 3 Coincidence of Points
Caused by Facet Shift

索引数组中,并删除后者中重复的索引。③ 遍历较大面的邻面,如果该面的邻面索引中不包含大面的索引号 bIndex,则将 bIndex 添加到这些面的邻面数组中。④ 对比平移两面的法向量方向,如果二者相同,将两面面积相加作为大面新的面积;若相反,则用大面面积减去小面面积作为大面的新面积。⑤ 将两面边界数组相加作为大面新的边界数组。大面边界数组中线段的相交方式有两种:完全重合与部分重合。在对其处理中,完全重合的两条线段直接删除(图 4(a));部分重合的线段删除较短的一条,并将长线段与短线段重合的部分截去(图 4(b));其中需要考虑到长线段处理后变为两条的特殊情况,如图 4(c)所示。调整线段顺序,使边界线段顺序存储,并合并共线的相邻线段。⑥ 删除平面链表 PolyList 中由于面平移而不复存在的冗余面,包括移动平面中面积较小的一个和由于平移面积变为零的平面。在删除面的同时,调整其他所有平面的邻面索引值。

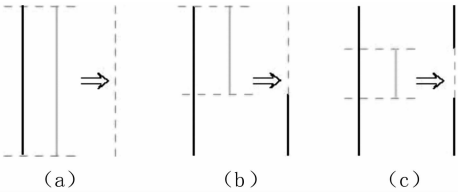


图 4 线合并的三种情形(合并后虚线消除,实线保留)
Fig. 4 Three Cases of Merging Lines

2.3.3 面的重剖分

获得建筑每一层次的 LOD 之后,为了满足可视化和存储的要求,必须对模型的各个平面进行三角剖分,可使用约束条件下任意平面轮廓的 Delaunay 三角剖分算法进行处理。

2.4 算法的执行过程

- 1) 对建筑模型进行结构化处理,获取化简所需的信息。
- 2) 删除模型所有原始的三角面,对形成的所有平面结构进行三角剖分,将剖分所得的新三角面添加到三角面数组 pFaces 中,记录面的个数。
- 3) 记录需要获取的 LOD 等级,根据建筑外接长方体确定各个方向的距离阈值。

4) 找出距离最短的两个面,如果该距离小于此方向的距离阈值,则进入步骤 5),否则标记该方向,在其他方向的平面中继续执行步骤 4);若三个方向的面均搜索完毕,再无满足平移条件的面,则得到此等级的 LOD 模型,进入步骤 7)。

5) 计算两面的面积比,确定需要移动的平面及其移动距离,调整其邻面的相关线段坐标后,对两面进行平移,同时计算变化后的各邻面面积。

6) 根据前面所述的平移后的面调整方法对平移后的相关面进行处理后重新回到步骤 4)。

7) 删除模型所有原始的三角面,对形成的所有平面结构进行三角剖分,将剖分所得的新三角面添加到三角面数组 pFaces 中,记录面的个数,得到该层次的 LOD 模型,算法结束。

2.5 实例与分析

采用 3ds 文件中的建筑模型作为实验对象,这里所选择的模型由一个独立的外表面来表示,而非多个简单几何体的堆砌,此实验不考虑建筑的纹理信息。对象的初始面数为 256 个,具有 4 个明显的凸起特征。根据本文算法,对其进行初步化简后,得到 LOD2,此层次模型仅剩 28 个面,其中 3 个凸起得到化简,一个特征进行了夸大;进一步化简后,得到 LOD3,三角面数为 20 个,仅保留了最为主要的特征。图 5 为采用此算法对建筑进行化简得到的 LOD 模型。

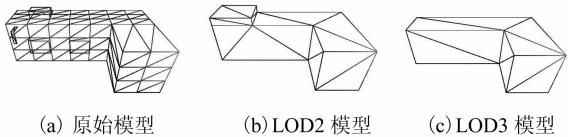


图 5 基于最短距离的面平移算法简化的建筑模型
Fig. 5 Building Model Simplified by the Algorithm

3 结 语

从综合的角度出发,设计了一种利于三维建筑综合进行的数据结构形式。实验证明,本文算法效率较高,而且化简结果相对较为理想。本文的实验基于模拟建筑模型进行,对于真实三维城市建筑的复杂性虽有所考虑,但仍不够全面。另

外,对于建筑化简过程中纹理与建筑几何模型一致性的保持,是三维建筑化简中的一大难点,是后续研究的主要内容。

参 考 文 献

[1] Meng L, Forberg A. 3D Building Generalization. Challenge in the Portral Geographic Information Issues of Generalization and Multi-Scale Representation[C]. A Ruaset Alced, Elsvise, 2005

[2] 杨帆,杨克俭,王玉华,等. 3DS 文件格式与自定义文件格式的转换[J]. 交通与计算机, 2004, 22(3): 101-104

[3] 周艳,朱庆,黄铎. 三维城市模型中建筑物 LOD 模型研究[J]. 测绘科学, 2006, 20(9): 74-77

[4] 朱庆,龚俊,杜志强,等. 三维城市模型的多细节层次描述方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(11): 965-969

[5] 刘强,李德仁. 基于二叉树思想的任意多边形三角剖分递归算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(5): 528-533

[6] Kada M. Automatic Generalization of 3D Building Models[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2002, 44(4): 243-248

[7] Forberg A. Simplification of 3D Building Data[C]. ICA Workshop on Generalization and Multiple Representation. Leicester, UK, 2004

[8] Forberg A. Generalization of 3D Building Data Based on a Scale-space Approach[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, 2004

[9] Lal J, Meng Liqiu. 3D Building Recognition Using Artificial Neural Network[C]. ICA Workshop on Generalization and Multiple Representation, Leicester, UK, 2004

[10] Kada M. Generalisation of 3D Building Models by Cell Decomposition and Primitive Instancing[C]. Joint ISPRS Workshop on Visualization and Exploration of Geospatial Data, Stuttgart, Germany, 2007

[11] Thiemann F, Sester M. Segmentation of Buildings for 3D-Generalisation[C]. ICA Workshop on Generalization and Multiple Representation, Leicester, UK, 2004

第一作者简介:葛磊,博士生,主要研究方向为自动制图综合和三维可视化。
E-mail:chxy_gray@yahoo.com.cn

Facet Shift Algorithm Based on Minimal Distance in Simplification of Buildings with Parallel Structure

GE Lei¹ WU Fang¹ QIAN Haizhong¹ WANG Zhuoning²

(1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)
(2 66240 Troops, 258 Shimen Road, Beijing 100042, China)

Abstract: Building with parallel structures is the most popular kind in modern city. As the widely used 3D city model, more and more generalization methods for this kind of building have been developed. This paper begins with the structuring of 3D building data and then a data structure that benefits the generalization is proposed. Orthogonal of building, introduction of polygon and acquisition of feature information are used in building construction. According to the requirement of visualizations, LODs of city buildings are divided into three levels. Based on which, a simplification algorithm of shifting facet based on minimal distance is realized in the simplification of the building with parallel structures. Experiment was done to prove the good efficiency and usability of the algorithm and the algorithm works well in simplification of buildings with parallel structures.

Key words: 3D building generalization; facet shift algorithm; simplification; LOD; minimal distance

About the first author: GE Lei, Ph.D candidate, majors in automatic generalization and 3D visualization.
E-mail: chxy_gray@yahoo.com.cn