

建筑物三维重建方法综述

王继阳¹, 文贡坚¹, 吕金建¹, 李德仁²

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 重点实验室, 湖南 长沙 410073;

2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘要: 建筑物三维重建的最终目的是高精度、全自动、逼真地生成建筑物的三维模型, 它是涉及摄影测量与遥感、计算机视觉、计算机图形学和模式识别等领域的一个热点问题。从建筑物检测、三维模型重建以及模型可视效果增强等 3 个方面出发总结了现有解决该问题的方法, 并从自动化程度、适用范围、复杂性等方面对一些代表性的方法进行了对比分析。最后根据当前的研究现状和应用需求, 提出了若干个开放性问题和一些可能的解决途径。

关键词: 三维重建; 建筑物检测; 建筑物模型; 纹理映射; 综述

中图分类号: TP 231.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2009)06-0832-09

1 引言

建筑物三维重建是获取建筑物三维结构信息的重要手段, 在城市规划、灾害监测、通信设施建设和数字城市等领域具有非常广泛的应用。长期以来, 它一直是摄影测量、遥感、计算机视觉、模式识别以及测绘等领域长期研究的重要课题。目前国际上具有代表性的研究机构有瑞士的苏黎世工业大学、德国的波恩大学、英国的牛津大学、法国国家信息与自动化研究所(INRIA)以及美国的南加州大学等, 国内的研究机构主要有武汉大学、华中科技大学以及中科院遥感所等。在几十年的发展过程中, 三维重建方法研究呈现以下几个特点: ① 可用数据源越来越丰富, 经历了由单一立体航空遥感影像到对多影像集成, 再到多数据源融合的过程, 新增数据包括 LIDAR、地面规划图、DEM、SAR^[1]、InSAR^[2,3]等; ② 对建筑物的描述越来越细致, 可重建的建筑物类型由简单的长方体模型到具有普遍意义的尖顶、人字形以及平顶多边形等, 再到复杂独特的建筑物模型, 从而可以更加细致地描绘建筑物的结构, 逐步提高模型可测量精度; ③ 建立的商业系统或实验原型系统自动化程度越来越高, 由最初的主要依靠人工

完成到主要由机器自动完成, 再到当前正在努力实现的全自动建筑物三维重建系统。目前已有多个成熟的商业半自动系统, 如 CC-Modeler^[4]、in-JECT^[5]、Ascender^[6]、ETIS^[7]等。

张祖勋院士^[8]总结了建筑物三维重建研究的最新发展, 对当前各种可用数据源的特点进行对比分析, 从几何建模与纹理映射两个方面介绍了几种有代表性三维重建方案的基本原理、存在的问题及其解决途径。Hu^[9]从数据源角度列举了建筑物重建的实现方法, 分析了利用立体影像、主动传感器(激光扫描仪和 LIDAR)数据以及多传感器数据融合的实现特点及适用解决的问题。Heuel^[10]等从应用模型的角度概括已有建筑物三维重建的两套思路, 对比了两种模型的优缺点, 提出了融合两种模型的设想。这些研究从不同角度或实现过程概括了已有的建筑物三维重建方法, 描述了该问题的解决框架, 但它们对建筑物三维重建的过程描述不够全面, 对已有方法的对比分析还比较粗略, 难以对三维重建问题解决方法的选择提供更具体的指导。

本文将建筑物的三维重建过程概括为 3 个步骤: 建筑物区域检测、建筑物三维模型重建以及模型可视效果增强, 期望通过对重建过程的更细致分解

收稿日期: 2009-02-28; 修订日期: 2009-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(60872153), 863 计划(2006AA12Z140)项目资助。

作者简介: 王继阳(1980—), 男, 博士研究生, 主要研究领域为数字摄影测量与遥感、计算机视觉、图像理解等。

E-mail: sunrice_yy@yahoo.com.cn.

和已有重建方法的对比分析,对建筑物三维重建方法的选择提供具体和直接的指导。

2 建筑物区域检测

作为建筑物三维重建过程的预处理步骤,目的在于定位和孤立待重建的建筑物区域,它的实现具有以下优点^[11]:一是可以根据指定区域选择相关特征,减少特征编组和特征匹配错误;二是场景区域的分类能被用于选择合适的目标模型或重建方法;三是能为一些参数提供定量信息,如主动轮廓的初始点或参数模型的初始化等。

建筑物区域检测的方法有人工指定和自动检测^[7,11,12]两类。人工指定的方法尽管准确性高,但费时费力,常用的自动检测方法通常分为3个步骤:DEM计算、高度分割以及地上场景目标分类。

2.1 DEM数据计算

基于不同的数据源,现有获取DEM数据的方法主要有3种。

(1) 利用单幅影像,通过分析场景目标的阴影与拍照时刻日照角度的关系,近似计算高程值^[13,14],这种方法计算简单,但由于阴影可能被遮挡,局部高程的计算可能存在较大的不确定性。

(2) 利用两幅或多幅立体影像,通过点、线或区域特征的匹配,利用立体成像几何计算这些特征的三维坐标(高程信息),这是检测建筑物区域的最常用方法。该方法的实现需要注意以下几个问题:一是高程值的准确性,这主要取决于特征匹配过程的正确性,对于未标定的影像,其标定误差也是重要的影响因素;二是高程点的密集性,基于点、线特征的匹配,由于特征的分散性,得到的高程点也是稀疏的,通常需要利用插值算法来增加高程点的密度,基于区域的匹配,对于大块缺乏纹理特征的区域,难于实现可靠的匹配,通常的办法是引入层次化的匹配策略;三是对于高度不连续性的保持,高度的不连续通常对应建筑物的屋顶的轮廓线或屋脊线,它们是建筑物区域检测、三维重建的重要特征。常见的处理方法有2种:一是通过匹配灰度图像边缘的方法^[11],二是设计不包含灰度边缘的自适应匹配窗口的计算方法^[7]。

(3) 利用主动传感器技术直接获取场景点的高程值。LIDAR获得的高程数据精度较高,但离散的高程点不利于准确定位建筑物的边缘,并且获取代价较高;InSAR能够获取连续的地面高程信息,尤其是先进的机载InSAR系统的地面分辨率最高已

达亚分米级^[3],高程精度也逐步提高,但该类型数据更适合于地形地貌的描述,对于具有高落差结构的建筑物来说,SAR图像自身的一些技术难题如阴影和叠掩等不易解决,相位解缠也是一个尚未有效解决的问题。

2.2 高度数据分割

高度数据分割的目的是从整个场景中分割得到高于地面的目标区域。已有的分割方法可大致分为3类:一是利用区域的DEM和DTM数据,两者相减获得高出地面的场景目标区域,该方法要求观测地域的DTM比较平坦,且高出地面的场景目标比较稀疏,从而DTM可以真正描述地形特征,然而,对于建筑物分布密集的城市区域,这种要求很难得到满足;二是利用DEM数据对场景区域进行高程分级或绘制等高线图来检测建筑物区域^[15,16],该方法要求DEM数据的精度较高且高程点分布密集,同时,不能用于检测一些复杂结构的建筑物,如被建筑物包围或半包围的地面区域的判定;三是从全局上分割不同高程的区域^[7,11],首先,通过生长合并算法将所有的高程点划分到不同的高程一致的子区域,并对所有的子区域进行地上和地面的二元标记,建立子区域邻接关系图,以子区域作为图的节点,以子区域间的邻接关系定义节点间的关系,利用此关系图实现对高程数据的全局最优分割。

2.3 地上场景目标分类

地上场景分类是为了从地上目标区域滤除植被等非建筑物目标,同时将具有不同高程的建筑物分离开来。实现方法按照所依据信息的不同可大致分为3类。

(1) 依据图像纹理信息的方法。Baillard^[17]提出了一种基于图像灰度梯度方向直方图信息熵的测度,如果待分类区域对应灰度均匀的建筑物表面区域,则计算的梯度方向比较一致,得到的熵较小,如果待分类区域对应植被等不规则自然物或是高差较大的多建筑物聚合区域,计算得到的熵将明显增大。

(2) 依据高程数据的方法。该方法同样是依据建筑物表面比较规则的特点。通常体现在沿区域边界点的高程特性随区域类型变化的不同特点^[18],或者区域内部点的近似法向矢量的统计特性差别^[7]。Martin^[19]利用建筑物表面与植被区域对激光束的不同反射特性来滤除植被区域。

(3) 依据多光谱影像数据的方法。通过计算归一化植被指数(NDVI)可以实现对植被区域的检测^[20,21],但该方法只能区分建筑物和植被,而不能

分离多个高差不同的邻接建筑物。

当然,上述的 3 个步骤并不是必需的。Suveg^[12]提出一种利用影像和地面规划图相结合的方法,无需计算 DEM 和进行高度分割,可以直接定位建筑物区域。

3 建筑物三维模型重建

模型作为一种先验信息,它的有效使用可以部分弥补特征提取中存在的问题。假定我们将一个待重建的完整建筑物三维模型记为 Q ,已知的先验模型记为 M ,则有下列关系:

$$Q = F(M) \quad (1)$$

其中: F 表示一种模型变换运算,它通常体现为一组模型参数 P ,如旋转、平移、缩放或剪切等。模型 M 则体现为一组特征基元以及它们之间的组合关系,记为 $M = (E, R)$, E 表示所有的特征基元, R 表示它们之间的关系。目前建筑物模型大致可分为两类。

一类是参数模型,即对于先验模型 M 来说, E 和 R 都是已知的,从而要得到 Q ,只需计算模型变换参数 P 。这是一种严格的模型约束,通过实现模型与影像中提取特征之间的全局最优匹配,如公式(2)所示,可以确定模型类型并求解对应的变换参数,从而实现模型整体求解。

$$\max_k [\text{Match}(B, M_k)] \sim (M_0, P_0) = Q \quad (2)$$

其中: B 表示从影像中提取的特征及它们之间的关系, $\text{Match}(\cdot, \cdot)$ 表示两个模型之间的匹配测度, M_0 表示按照该测度计算的最优匹配模型, P_0 是 M_0 到 Q 的最优变换参数。

基于参数模型的方案实现起来相对简单,重建结果比较可靠和精确,并且能实现对被遮挡部分或特征提取不完整部分的重建,但适用的建筑物类型受限于已有的建筑物模型库,该方法通常无法完成复杂结构屋顶的建筑物重建。

另一类是一般模型,即 E 是已知的,而 R 是未知的。这是一种松散的模型约束,它的求解不再是先求解 R 而得到 M 进而再求解变换参数,而是依据下面的关系式:

$$Q + F(E, R) = (F(E), F(R)) \quad (3)$$

直接求解变换后的特征基元以及它们之间的关系,从而直接得到模型 Q 。 $F(E)$ 可以从原始数据(通常指影像)中直接提取到,但通常是不完整的或不准确的; R 和 F 是未知的,从而 $F(R)$ 不能通过 R 来求解,通常的做法是在 $F(E)$ 上强加一些合理的通用假设来构造 $F(R)$ 。显然,基于一般模型的方法是

一种自底向上的构造过程,由于缺乏严格的关系约束 $R, F(E)$ 的提取和 $F(R)$ 的构造只能是一种局部的行为,构造过程难以实现全局最优。

基于一般模型的方案适合于重建和描述复杂结构或未知类型的建筑物,但重建过程复杂且不稳定,对图像特征提取和特征匹配结果的依赖性很强,并且难以可靠解决被遮挡部分的重建。

3.1 基于参数模型的方案

基于参数模型的方案事先定义建筑物的模型,或给定一个模型库,认为该建筑物属于其中的一种类型,解决该问题的关键是定义参数模型、选择匹配特征以及定义模型匹配测度。参数模型不应定义得太过严格,否则由于特征提取的误差或建筑物结构的微小变化,使得它与提取特征不匹配,但也不能定义得过于松散,否则待求解的参数过多,有效值范围太大,会使最优匹配的求解变得复杂;匹配特征的选择应该做到简练但充分,越少的特征,涉及的关系越简单,匹配计算的复杂性越低,充分是为了使选取的特征能够足以区分不同的模型;匹配测度的定义尽量满足单峰和显著性两个特点,以实现稳定的全局最优化求解。Suveg^[22]基于互信息定义了模型与影像的匹配测度,张祖勋院士^[23]建立一种基于物方空间几何约束的最小二乘匹配平差模型用于实现影像中建筑物直线边缘和物方几何模型的最优匹配。

较早提出的建筑物重建方法大多采用基于参数模型的方案,目前它仍被广泛应用,主要体现在以下 3 个方面。

(1) 重建精度要求不高,只需要获得建筑物的大致高程。

平顶、尖顶或人字形模型是常见的参数模型,对于选择平顶模型重建建筑物的方法^[24],只需获取建筑物的垂直边缘和屋顶轮廓。另外,当采用的数据源本身精度有限时,不可能期待获得高精度的重建结果,如利用卫星影像的重建^[25-27]。

(2) 已知场景中建筑物的类型,并可用简单的模型来描述。

Jaynes^[28]利用由影像立体匹配获得的 DEM 建立建筑物表面的方向直方图,将其与已有模型库中每个模型的方向直方图进行匹配,确定若干个可能的匹配模型,最后,将这几个模型拟合到 DEM,取对应最小拟合误差的模型为最终结果。Vinson^[29]提出一种以矩形为基础重建屋顶的方法,以平顶多边形屋顶模型假定为基础,引入一组矩形来迭代地分解近似,利用一种参数化变形模型对建筑物的位置

和尺寸求精。Noronha^[30]提出一种基于特征感知编组假设生成及验证的方法,用于重建具有平顶矩形或人字形结构屋顶的建筑物。更多的方法可参考Robert^[6]、Martin^[19]、Chilton^[31]等的研究工作。

(3) 复杂的建筑物模型可以用有限的简单模型单元组合得到。

整个建筑物可以作为多个部分单独重建,依据它们之间的连接关系聚合成最终的复杂模型。常见的拆分方式有两种:一种是以屋顶表面块为单元拆分屋顶^[32,33],另一种是以建筑物体积元进行整体拆分^[34]。

3.2 基于一般模型的方案

利用一般模型方案,重建前不需假定建筑物的类别,通常没有任何的先验知识,而是直接从获取的遥感数据出发,提取特征,进行特征编组,形成复合的结构特征。多面体结构是一个具有广泛代表意义的模型,目前在绝大多数重建方案中被接受。基于多面体结构的重建方法将建筑物屋顶视为多个平面块拼接的几何结构,通过构造所有的三维平面块并建立它们之间的拓扑关系可以重建建筑物屋顶结构,最后,合并竖直墙以得到完整的建筑物三维模型。这其中获取三维平面以及有效处理平面拼接中的冲突是该类方法的难点所在。以多面体结构作为模型的实现方案按照其构造过程的差别又可细分为2类。

3.2.1 三维线特征—三维平面—三维模型

由影像中提取的二维线特征出发构造屋顶的三维线框结构图。三维线特征既包括三维直线段也包括编组它们得到的组合特征,是由对应的二维线特征经过匹配和三角化计算得到的。该类方案的实现分为5个步骤:特征提取、特征匹配、三维特征生成、三维特征共面编组以及平面聚合与冲突处理。

(1) 特征提取是一个重要的实现环节。在重建应用中,最常用的是直线提取算法^[35,36],提取结果中不可避免存在着多种不确定性问题^[37,38],如提取不完整、直线断裂、直线偏离真实位置、过提取以及提取错误直线等。广义的特征提取还包括特征编组,即由多条直线特征编组形成更可靠、信息更丰富、数量更少的组合特征,利用它们将可以获得更加可靠的匹配结果。最常见的组合特征包括角特征、平行线、矩形等。感知编组方法^[30]是实现特征编组的一种有效手段。

(2) 特征匹配是实现建筑物三维重建的关键步骤。Jones^[39]详细讨论了特征匹配问题,概括了已

有的解决方法,提出了特征匹配问题的一个解决框架,即特征基元的选择,匹配约束条件的应用,匹配策略的设计以及优化算法的选取。

(3) 三维特征生成是根据特征匹配结果和成像模型参数,经立体成像几何计算得到。

(4) 三维特征共面编组可以实现3个方面的作用:一是形成建筑物模型表面,二是合并冗余的三维线特征,三是滤除错误的三维线特征假设。具有代表性的是Baillard^[40]等提出的一种由三维直线生成半平面假设进而求解真实平面的方法。

(5) 平面聚合与冲突处理。这通常是一个几何推理过程,通常会引入一些启发性知识,处理包括平面不闭合、平面间遮挡、模型内空隙以及遮挡部分填补等问题。由于该过程的复杂性,成熟的系统中该步骤通常由人工辅助计算机完成。Heuel描述了2D和3D点、线、面与它们的不确定性以及由它们构造的新的几何结构和被传播的不确定性^[42],利用它们可以在给定置信度的情况下从统计意义上测试点、线、面之间的各种几何关系,这对于可靠实现平面聚合是有帮助的。在此基础上,Heuel^[41]提出了一种基于拓扑推理和几何推理的建筑物重建算法。邵振锋^[43]等提出了拓扑链、外拓扑和内拓扑的概念,分析了复杂房屋的内拓扑和外拓扑的三维重建方法,构造了复杂房屋的三维拓扑数据模型,利用其定义的饱和度可以检验模型的完整性。

3.2.2 三维平面—三维线特征—三维模型

该方案以获取三维平面为初始目标,它与前一种方案的区别体现在前两个步骤上。根据使用数据源的不同,该方案有以下3种不同的实现方式。

(1) 基于双视或多视立体影像。首先,通过影像匹配,获取密集分布的高程点,通过区域生长方法和共面分析得到一系列开放的三维平面;其次,提取图像中的边缘,在三维平面引导下对直线边缘进行匹配,得到作为三维平面块的边界直线,同时,利用三维平面相交可以进一步获取平面边界,封闭三维平面。

Cord^[7]预先指定平面的数量,定义平面参数的后验概率,通过一个迭代优化算法求解最终的平面参数。该方法类似于基于参数模型的方案,但显然这个松散的多平面模型更具一般性。江万寿^[44]提出一种基于约束Delaunay三角网的建筑物屋顶三维重建方法,首先应用嵌入置信度的边缘检测算法对立体影像对进行边缘检测,基于边缘线段构建约束Delaunay三角网,接下来根据感知编组的一般原

理,基于三角网对影像进行分割并执行松弛法影像匹配,直接得到建筑物区域的 DSM,即获得建筑物屋顶的粗糙三维模型,结合由影像提取的边缘进一步精炼得到的三维模型。

(2) 基于影像和 LIDAR 数据。此时,密集分布的高程点是直接可利用的,对它们进行共面分析可直接得到开放的三维平面,闭合平面的边界由影像直线边缘匹配和高程数据梯度分析共同来构造。该方法对于由影像中提取直线特征的不确定性具有较好的抗干扰能力,这是因为直接的高程数据可以一定程度上弥补缺失的信息并滤除不一致的错误。由于这一明显的优势,该方法目前正在获得更多的关注。利用该方法可以构造倾斜的平面^[45,46],但显然利用 LIDAR 数据生成水平的平面,即构造平顶或多平面层叠的屋顶会更加准确^[20,47,48]。

(3) 基于单一的 LIDAR 数据,三维平面的获得与上述方法是相同的,相区别的是平面的封闭边缘完全由对高程数据的梯度分析或平面相交得到。由于影像通常是可用的,这种方法用得不多^[49,50]。Ma^[51]提出了一套单独利用 LIDAR 数据重建建筑物屋顶结构的方法,但考虑到 LIDAR 数据中可能存在的误差,最后利用影像数据对得到的整体几何结构进行求精。

无论是从影像提取的边缘信息还是从 LIDAR 数据得到的高程信息,都不可避免地存在误差,在重建过程中会被传导甚至放大,最终得到的建筑物模型将存在一定的误差。因此,基于一般模型的重建方案通常需要对生成的三维模型进行局部几何校正,从而可以提高模型的可测量精度,并降低纹理映射的复杂性。

建筑物通常具有规则的形状,如平行、垂直、等高和对称等几何关系是普遍存在的,利用这些特殊的几何约束条件可以实现对模型精度的改善。Zunic^[52]提出一种测量由特征提取和特征编组方法得到的多边形矩形度的方法,对矩形的判定有助于对模型进行纠正。另外,将生成的模型投影到所有的影像^[51],对比投影与影像边缘特征也可以达到模型求精的目的。

4 模型可视效果增强

在多数三维重建应用中,模型可量测不再是唯一需求,可视性成为另一个重要方面。影像数据提供了被摄场景的丰富纹理信息,给人以真实感,将影

像中的二维纹理信息映射到三维模型表面成为一个不应忽略的步骤。

实现纹理映射的关键问题有两个:一是建筑物三维模型与真实影像中目标区域的配准,这是一个 2D/3D 配准问题,许多用于解决基于模型的目标识别问题以及目标姿态求解问题的方法^[53,54]都是可参考的。由人工确定配准控制点对是一种可靠但效率低下的方法,Fujii^[47]提出一种自动配准建筑物三维模型投影轮廓与真实影像中目标区域轮廓的方法,以图像中提取的边缘像素对作为匹配特征,并利用基于通用 Hough 变换的投票方法减少错误匹配。Wu^[55]基于点、线拓扑关系表示建筑物几何模型,提出一种由粗到精的轮廓线影像匹配算法。另一个关键问题就是被遮挡部分纹理信息的补充。正射校正的航空影像和卫星影像通常只能提供建筑物顶部的纹理信息和部分较低分辨率的正面或侧面信息,而且由于建筑物间的相互遮挡,想要完整描述建筑物显然是不可能的,采用多视影像或近景影像将是很好的补充手段^[56]。然而,近景摄影的获取不仅效率低下,遮挡更成为其不易解决的困难^[8]。

另外,为了实景浏览的需要,还必须建立一系列变换模型,根据已有的纹理信息,计算当前视角和设定日照条件下可见的建筑物表面灰度信息的变化、阴影的影响以及遮挡情况的变化等^[6]。

5 存在的问题及进一步研究方向

通过对建筑物重建应用需求的分析,我们认为一套好的建筑物三维重建系统或方法需要具备以下几个方面条件:① 模型的正确性,尽量不产生虚假的三维结构以及不丢失重要的组成部分;② 模型的完整性,主要体现在对于被遮挡部分的补充以及对形成的开放结构的闭合;③ 模型的精确性,要求模型具有较高的量测精度;④ 实现过程的自动化,在确保重建结果质量的基础上,尽量减少操作人员的干预;⑤ 模型的真实感,要求重建模型不仅具有较高的尺寸精度,还要有较好的可视性。

根据这些标准,结合目前建筑物三维重建的研究现状,我们认为以下几个问题是当前以及将来一段时间需要努力解决的问题。

(1) 特征提取问题

由影像中提取特征是绝大多数重建算法中必不可少的,特征不完整、不准确或出现错误是普遍存在的,该问题的有效解决将极大降低重建过程的复杂

性。经过多年努力,仍未得到完整的解决方案。

(2) 特征匹配问题

特征匹配进而执行立体解算是由 2D 信息建立三维知识的重要手段,很多方法被提出,但两个关键问题——部分遮挡问题和特征提取不确定性问题至今未能有效解决。

(3) 几何和拓扑推理问题

该问题的有效解决需要充分整合立体成像几何关系以及关于建筑物结构的经验性知识,其中包含的智能因素是重建算法自动化实现的瓶颈之一,目前鲜见成熟的解决办法。

(4) 纹理映射问题

对于 3D 模型与影像的配准,目前已有较多方法予以解决,并取得了比较不错的效果。然而,遮挡现象是普遍的,合理生成被遮挡部分的纹理信息是当前必须要解决的问题。

(5) 重建模型测量精度评价问题

现有重建方法对于重建模型的评价主要是依据人的主观印象,针对重建模型的完整性和正确性两个方面进行评价,缺少对于模型精度的评价,而这对于模型的测量应用是很重要的指标。

以上所列问题中有些也是其它领域研究中亟待解决的,如特征提取和特征匹配问题,经过几十年的发展,尽管提出了很多的研究方法,但并未从根本上解决问题。对于建筑物重建这一特定任务,主要有以下几个研究方向:

(1) 融合多种数据

影像信息是有限的,长期研究结果证明,难于从中进一步挖掘有用的信息,随着 LIDAR、InSAR、DEM 等可以直接提供高程信息的数据可用,将可能回避其中存在的难题,如特征匹配问题,并且可以对特征提取的结果进行补充。另外,地面规划图等先验知识以及多光谱影像信息的应用,将会降低建筑物区域检测的难度。发挥各种信息的优势可以简化重建问题的复杂性并提高重建质量,这在已有的方法中已经得到证明。从本文介绍的重建方法步骤中可以看到,多种数据源的信息得到应用,如可见光影像、多光谱数据、LIDAR 等直接高程信息以及地面规划图等,它们具有不同的特点,有机组合它们,将能够发挥各自的优势。然而,已有的方法更多地是一种信息的累加,而并没有将这些数据纳入到一致的空间里同步求解,各种数据源之间缺乏相互作用,

没有统一的数据误差分析机制,限制了融合的效力。研究有效的数据融合机制将是未来研究的热点方向之一。

(2) 建筑物遮挡部分的重建。遮挡问题一直是立体视觉里最难以解决的问题。对于建筑物,结构的完整性以及各个视角下模型纹理的可视性将是未来研究的一个重点方向。可以考虑的思路有 2 个:一是增加观测的视角,尤其是近景影像,使建筑物完整可见;二是提炼和应用建筑物结构的一般性规则,这些知识的应用将有助于依据可见部分联想被遮挡部分,提高重建的完整性,而且还能够一定程度上限制重建问题的求解空间,降低问题求解的复杂性。

(3) 模型重建质量评价

影像是在某一观测视角中建筑物的直接的真实表现,将 3D 模型投影到 2D 影像上,将投影得到的点、线特征与影像中提取的特征进行对比,将可以对重建模型的正确性和准确性进行可靠的评价,但作为 2D 空间的影像与 3D 空间的模型是有显著差异的,而且重建错误和误差在不同观测视角中具有不同类型和程度的表现,需要提出一个统一的框架对模型进行统一尺度的衡量,合并多个视角的影像实现对模型更为全面的评价。可以考虑的思路:以 2D 空间到 3D 空间的误差传播为线索,将不同视角影像与模型的差异统一到 3D 空间,结合贝叶斯网络和 D-S 证据理论等方法实现对重建模型的定量的、一致的和全面的评价。这方面的内容可参考德国波恩大学的相关研究成果。

参考文献:

- [1] Xu F, Jin Y Q. Automatic Reconstruction of Building Objects from Multiaspect Meter-Resolution SAR Images [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(7): 2336-2353.
- [2] Stilla U, Soergel U, Thoennessen U. Potential and Limits of InSAR Data for Building Reconstruction in Built-up Areas [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 58(1): 113-123.
- [3] Brenner A R, Roessing L. Radar Imaging of Urban Areas by Means of very High Resolution SAR and Interferometric SAR [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, 2007, 2689-2693.
- [4] Gruen A, Wang X. CC-Modeler: A Topology Generator for 3D City Models [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Re-

- mote Sensing, 1998, 53(5): 286-295.
- [5] Gulch E, Muller H. New Applications of Semi-automatic Building Acquisition[C]. Zurich: Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images(Ⅲ), 2001: 103-114.
 - [6] Collins R T. The Ascender System: Automated Site Modeling from Multiple Aerial Images[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 72(2): 143-162.
 - [7] Cord M, Jordan M, Cocquerez J P. Accurate Building Structure Recovery from High Resolution Aerial Imagery[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 82(2): 138-173.
 - [8] Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. Solutions and Core Techniques of City Modeling[J]. World Science-technique R&D, 2003, 25(3): 23-29. [张祖勋, 张剑清. 城市建模的途径与关键技术[J]. 世界科技研究与发展, 2003, 25(3): 23-29.]
 - [9] Hu J, You S, Neumann U. Approaches to Large-scale Urban Modeling[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2003, 23(6): 62-69.
 - [10] Heuel S, Kolbe T H. Building Reconstruction: The Dilemma of Generic Versus Specific Models[J]. Zeitschrift Fur Kunstliche Intelligenz(KI; Magazine for Artificial Intelligence), 2001, 15(3): 57-62.
 - [11] Baillard C, Maitre H. 3-D Reconstruction of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery: A Focusing Strategy[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 76(3): 244-258.
 - [12] Suve I, Vosselman G. Reconstruction of 3D Building Models from Aerial Images and Maps[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 58(3-4): 202-224.
 - [13] Huertas A, Nevatia R. Detecting Buildings in Aerial Images[J]. Computer Vision Graphics Image Process, 1988, 41(2): 131-152.
 - [14] Irvin R B, McKeown D M. Methods for Exploiting the Relationship between Buildings and Their Shadows in Aerial Imagery[J]. IEEE Trans. on Systems Man Cybernet, 1989, 19(6): 1564-1575.
 - [15] Haala N. Detection of Buildings by Fusion of Range and Image Data[C]. The XVIII Congress of ISPRS, Comm. III, Munich: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, 30: 341-346.
 - [16] Baltsavias E, Mason S, Stallman D. Use of DTMs/DSMs and Orthoimages to Support Building Extraction[C]. Basel: Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images, 1995, 199-210.
 - [17] Baillard C. Extraction and Characterization of Above-ground Areas in a Peri-Urban Context, in Mapping Buildings, Roads and Other Man-made Structures from Images[C]. Proceedings of the IAPR TC7 Workshop on Remote Sensing and Mapping, Vienna, 1996, 159-174.
 - [18] Dash J. Automatic Building Extraction from Laser Scanning Data: An Input Tool for Disaster Management[J]. Advances in Space Research, 2004, 33: 317-322.
 - [19] Martin H. Fusion of LIDAR Data and Aerial Imagery for Automatic Reconstruction of Building Surfaces[C]. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on "Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas", Berlin, 2003, 82-86.
 - [20] Sohn G, Dowman I. Data Fusion of High-resolution Satellite Imagery and LIDAR Data for Automatic Building Extraction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62: 43-63.
 - [21] Zebedin L. Towards 3D Map Generation from Digital Aerial Images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(6): 413-427.
 - [22] Suve I, Vosselman G. Mutual Information Based Evaluation of 3D Building Models[C]. The 16th International Conference on Pattern Recognition, Quebec-City, 2002, 3: 557-560.
 - [23] Zhang Zuxun, Zhang Jianqing, Hu Xiangyun. Semiautomatic Building Extraction by Least Squares Matching Based on Geometrical Constraints in Object Space[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(4): 290-295. [张祖勋, 张剑清, 胡翔云. 基于物方空间几何约束最小二乘匹配的建筑物半自动提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(4): 290-295.]
 - [24] Tang Liang, Xie Weixin, Huang Jianjun, *et al.* Automatic High-rise Building Extraction for Aerial Images[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(7): 1199-1204. [唐亮, 谢维信, 黄建军, 等. 从航空影像中自动提取高层建筑物[J]. 计算机学报, 2005, 28(7): 1199-1204.]
 - [25] Baltsavias E, Pateraki M, Zhang L. Radiometric and Geometric Evaluation of IKONOS Geo Images and Their Use for 3D Building Modeling[C]. Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space", Hannover, 2001, 1-21.
 - [26] Fraser C S, Baltsavias E, Gruen A. Processing of IKONOS Imagery for Submetre 3D Positioning and Building Extraction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 56(1): 177-194.
 - [27] Lafarge F, Trontin P. An Automatic Building Extraction Method: Application to 3D-City Modeling[R]. Research Report of INRIA, 2006.
 - [28] Jaynes C, Riseman E, Hanson A. Recognition and Reconstruction of Buildings from Multiple Aerial Images[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2003, 90(1): 68-98.
 - [29] Vinson S, Cohen L D. Multiple Rectangle Model for Buildings Segmentation and 3D Scene Reconstruction[C]. The 16th International Conference on Pattern Recognition, Quebec-City, 2002, 3: 623-626.
 - [30] Noronha S, Nevatia R. Detection and Modeling of Building from Multiple Aerial Images[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(5): 501-518.

- [31] Chilton T D, Jaafar J, Priestnall G. The Use of Laser Scanner Data for the Extraction of Building Roof Detail Using Standard Elevation Derived Parameters[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 32(3W14): 137-143.
- [32] Scholze S, Moons T, Gool L V. A Probabilistic Approach to Building Roof Reconstruction Using Semantic Labelling[C]. *The 24th DAGM Symposium for Pattern Recognition*, Zurich, 2002, 257-264.
- [33] Scholze S, Moons T, Gool L V. A Probabilistic Approach to Roof Patch Extraction and Reconstruction[C]. *Zurich: Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images(III)*, 2001, 195-200.
- [34] Suveg I, Vosselman G. Automatic 3D Building Reconstruction [C]. *Proceedings of SPIE on Three-dimensional Image Capture and Applications V*, San Jose, 2002, 4661:59-69.
- [35] Wang Runsheng. *Image Understanding*[M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 1995, 67-86. [王润生. 图像理解[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995, 67-86.]
- [36] Wen Gongjian, Wang Runsheng. A Robust Approach to Extracting Straight Lines [J]. *Journal of Software*, 2001, 12(11):1660-1666. [文贡坚, 王润生. 一种稳健的直线提取算法[J]. 软件学报, 2001, 12(11):1660-1666.]
- [37] Christmas W J. Structural Matching in Computer Vision Using Probabilistic Reasoning[D]. *The Dissertation of the University of Surrey, USA*, 1995.
- [38] Cheng Y Q, Wang X G. Three-dimensional Reconstruction of Points and Lines with Unknown Correspondence across Images[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2001, 45(2):129-156.
- [39] Jones G A. Constraint, Optimization, and Hierarchy: Reviewing Stereoscopic Correspondence of Complex Features[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1997, 65(1):57-78.
- [40] Baillard C, Zisserman A. A Plane-sweep Strategy for the 3D Reconstruction of Buildings from Multiple Images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B2):56-62.
- [41] Heuel S, Forstner W, Lang F. Topological and Geometrical Reasoning in 3D Grouping for Reconstructing Polyhedral Surfaces[C]. *Proceedings of the XIXth ISPRS Congress, XXIII*, Amsterdam, 2000, 397-404.
- [42] Heuel S, Forstner W. Matching, Reconstructing and Grouping 3D Lines from Multiple Views Using Uncertain Projective Geometry[C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Kauai, 2001, 2: 517-524.
- [43] Shao Zhenfeng. 3D Extraction and Reconstruction of Man-made Objects Based on Aerial Stereo Image Pair[D]. *The Dissertation of Wuhan University, China*, 2004. [邵振峰. 基于航空立体影像对的人工目标三维提取与重建[D]. 武汉大学博士论文, 2004.]
- [44] Jiang Wanshou. Aerial Images Matching across Multiple Views and Automatic Extraction of Regular Buildings[D]. *The Dissertation of Wuhan University, China*, 2004. [江万寿. 航空影像多视匹配与规则建筑物自动提取方法研究[D]. 武汉大学博士论文, 2004.]
- [45] Seo S. Model-based Automatic Building Extraction from LIDAR and Aerial Imagery[D]. *The Dissertation of the Ohio State University*, 2004.
- [46] Peternell M, Steiner T. Reconstruction of Piecewise Planar Objects from Point Clouds[J]. *Computer-aided Design*, 2004, 36:333-342.
- [47] Fujii K, Arikawa T. Urban Object Reconstruction Using Airborne Laser Elevation Image and Aerial Image [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(10): 2234-2240.
- [48] You H J, Zhang S Q. 3D Building Reconstruction from Aerial CCD Image and Sparse Laser Sample Data[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44:555-566.
- [49] Vosselman G. Building Reconstruction Using Planar Faces in Very High Density Height Data[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 32(3-2W5):87-92.
- [50] Rottensteiner F, Briesse C. Automatic Generation of Building Models from LIDAR Data and the Integration of Aerial Images[C]. *Proceedings of the ISPRS Working Group III/3 Workshop on "3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and Insar Data"*, Dresden, 2003, 34(3/W13):174-180.
- [51] Ma R. Building Model Reconstruction from LIDAR Data and Aerial Photographs[D]. *The Dissertation of the Ohio State University*, 2004.
- [52] Zunic J, Rosin P L. Rectilinearity Measurements for Polygons [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(9):1193-1120.
- [53] Jurie F. Solution of the Simultaneous Pose and Correspondence Problem Using Gaussian Error Model[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1999, 73(3):357-373.
- [54] Olson C F. A General Method for Geometric Feature Matching and Model Extraction[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2001, 45(1):39-54.
- [55] Wu Jun. Research on Rapidly Reconstructing Texture for Facades in 3D City Modeling [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(4):317-323. [吴军. 三维城市建模中的建筑墙面纹理快速重建研究[J]. 测绘学报, 2005, 34(4):317-323.]
- [56] Debevec P, Taylor C, Malik J. Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A Hybrid Geometry and Image Based Approach [C]. *Proceedings of Siggraph*, New York: ACM Press, 1996. 11-20.

A Review on Reconstructing Buildings

WANG Ji-yang¹, WEN Gong-jian¹, LV Jin-jian¹, LI De-ren²

(1. ATR Key Laboratory, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430079, China)

Abstract: Reconstructing buildings aim at generating high-precision, automatic and realistic 3D models for the buildings, which have been researched as one of the focus problems in multiple fields such as photogrammetry, remote sensing, computer vision, pattern recognition and computer graphics for a long time. Thanks to the comprehensive application demands and developments of the related techniques, the researches on reconstructing and surveying buildings are being active and a mass of approaches are usable. The realization of reconstructing buildings are divided approximately into three main steps: ① detecting the regions which include buildings, which will limit the following processes in the restricted regions and then reduce the complexity of the problem, ② reconstructing 3D models of the buildings, the most critical step, in which two schemes are presented, such as the scheme based on parameter models and that based on generic models, and ③ improving the visualization, which make the models more real by mapping texture. Large numbers of classic approaches to solve the problems in above steps are analyzed in several aspects such as the automatic level, adaptation and complexity. In the whole process the second step occupies most of the content. In the end, according to the current progresses and more requirements, several open problems are enumerated, which need more efforts to propose an efficient approach, and then the imaginable ways to solve them are proposed.

Key words: Building reconstruction; Building detection; Building model; Texture mapping; Review