

多视影像三维线云重建技术及其智能化发展展望

魏东,刘欣怡,张永军

武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉 430079

收稿日期:2023-09-30;修回日期:2024-05-27

中图分类号:P23

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2024)06-1025-12

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42301499;42201474);博士后创新人才支持计划(Bx20220241)

第一作者简介:魏东(1992—),男,博士后,主要从事三维线云重建与应用研究。E-mail: weidong@whu.edu.cn

通信作者:刘欣怡 E-mail: liuxy0319@whu.edu.cn

摘要:三维线云是具有几何结构与语义信息的三维线段集合,可以作为实景三维构建中高效的引导,控制与抽象表达元素,弥补点云的边缘描述缺陷与初始结构的缺失,是改变传统三维模型“一张皮”(不同对象相互粘连,难以指导空间分析与决策)的重要结构化特征。然而,如何从多视影像中重建好用的线云,将线云在实景三维中用好,一直是本领域的难点问题。本文回顾三维线云的发展,介绍相关的重建方法,分析存在的难点与不足;结合从数字化走向智能化的测绘科技转型背景,论述线云在实景三维中建什么,如何建与怎么用,对线云重建和应用的智能化发展予以介绍和展望,希望为实景三维重建与线云研究的相关人员提供参考。

关键词:三维线云;实景三维;三维重建;智能化测绘;多视影像

三维线云作为三维直线段的集合,是人工场景中广泛存在的几何特征。尽管“点云”一词已广为人知,但“线云”(line cloud)这一术语直到2015年才在文献[1]中出现。早在20世纪80年代,直线就因其独特的几何属性成为影像匹配领域的重要特征,进行目标跟踪^[2]、影像位姿恢复^[3]及三维场景重建等工作^[4]。然而,自20世纪90年代起,随着点特征算子的迅速发展,从初始的旋转不变算子^[5]、仿射不变算子^[6],到如今利用深度学习技术实现端到端的特征训练与匹配^[7],点特征在二维影像到三维场景的转换中逐渐占据了主导地位。在此阶段,国内外学者在改进直线特征算法的同时,也对其在摄影测量与计算机视觉中的应用进行了深刻地思考。在智能化测绘^[8]与实景三维中国建设^[9]的背景下,如何获取高质量的三维线云并有效地服务于实景三维,正在成为重要的研究方向。

如图1所示,直线特征作为线云的基础构成元

素,其优势相较于点特征体现在3个方面:首先,直线蕴含直观的几何结构,能够以简洁的方式表达场景的轮廓,为多源数据融合提供引导与辅助^[10],并显著提高模型的边界精度^[11-14];其次,点云的语义仅存在于点集合之中,而单条线段即可表达建模对象的局部结构和语义信息,使大场景的结构提取更加高效^[15-16];最后,在弱纹理场景中,线段的拓扑和方向约束能有效克服点特征可能导致的匹配失败;特别在室内即时构图与定位中(simultaneous localization and mapping, SLAM),线段匹配与重建已成为主流技术方案^[17-19]。然而,线云的发展与实景三维的需求还存在一定的差距:直线提取^[20-24]仍处于发展阶段,存在“欠提取”与“过提取”的难题;多视线段关联中,影像线段的拟合误差与前方交会精度^[25]影响多视线段关联,难以建立准确的“多对一”关系,带来较多的重复线云。

从数字化测绘走向智能化测绘,是实现测绘科

技转型和升级的必然选择,也是支撑实景三维建模与赋能应用的基本思路^[8]。线云作为基础空间特征,为实景三维中的实体化建模与立体化重构^[26]提供数据支持,可以作为三维建模产品向城市市场产品转化的辅助特征,从而拓展地理空间的感知智能。抓住智能化测绘转型的机遇,将线云重建与处理从数字化向数智化发展,服务于下个十年的智能

化实景三维建设,对于线云研究的应用与发展具有重大意义;同时对现有的线云重建技术提出了新的挑战。线云的发展是克服几何缺陷,获取好用的线云,利用结构和语义,用好线云的过程。笔者在此回顾多视三维线云的重建技术、在实景三维中的应用场景与当前的技术难点,对其在智能化测绘与实景三维建设中发挥的作用进行论述与展望。

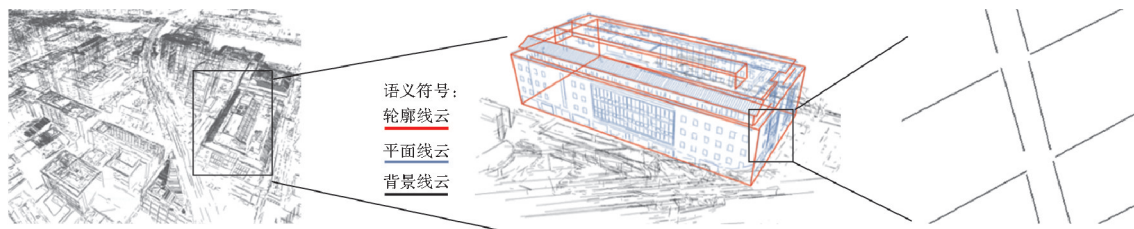


图 1 三维线云的几何与语义示例

Fig. 1 Examples of geometry and semantics of 3D line clouds

1 三维线云重建的基本方法

如图 2 所示,线云重建作为实景三维构建的一

项技术,一般包含影像位姿恢复、线特征提取、线段匹配、多视特征关联及前方交会等核心步骤。表 1 对近年来的线云重建算法进行了归纳总结。

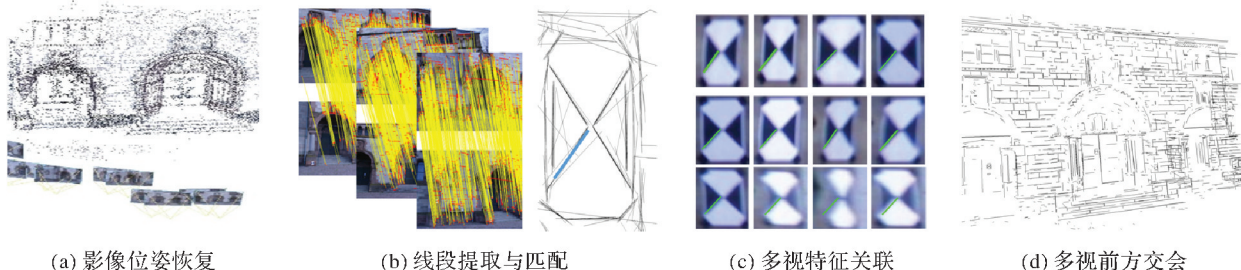


图 2 多视线云重建典型步骤^[24]

Fig. 2 Typical steps for 3D line cloud reconstruction in multiple images^[24]

表 1 近年来线云重建算法简介

Tab. 1 An overview of the recent line reconstruction algorithms

算法	特点
文献[27]	三维线段的反投影检验中使用纹理强度评价,不依赖直线提取结果;可获得较多数量的三维线段,但运行速度慢
Line-sweep ^[28]	采用匹配点引导的扫描匹配策略,效果稳健且计算复杂度低
文献[29]	基于线段编组的平面约束纠正错误前方交会;匹配过程不需要影像的初始位姿;可以重建出较多且规整的三维结构;运行速度未知
Line3D++ ^[15]	并行匹配,运行速度较快;使用点线联合的光束法平差优化了重建精度;但严格的单一阈值融合策略使得线云数量较少
文献[30]	利用深度学习改善两视前方交会沿核面的误差问题;可以重建较多的线段;但深度学习策略的泛化性有待考察
ELSR ^[16]	利用 CPU 多线程加速,大场景重建速度快;线云数量较多;但单一融合阈值与代表线段获取的线云仍需要进行进一步的精度优化
文献[31]	利用多尺度策略改进了线段提取算法;可重建出更多的三维线;并在此基础上进行了建筑物重建
Linemap ^[32]	支持不同的线段提取与匹配算法组合;引入灭点与特征点优化精度;数量与精度表现较好;速度有待优化
文献[33]	使用深度图提升速度与精度;数量与质量上都有较好的表现;对三维网格优化进行了应用
SLAM ^[17-19]	增量式重建;需要窄基线像对

共性问题如下:

(1) 使用单一阈值进行多视特征关联,容易出

现重复线云。

(2) 试验评价方法侧重于线段的精度;欠缺多

视特征关联的准确性评价。

(3) 重建的线云缺乏语义信息。

鉴于影像位姿恢复^[34]与直线特征检测^[20]是众多三维重建与模式识别工作的基础步骤,本文将其视为独立的研究内容而不再论述。

1.1 两视线段特征匹配

线段匹配建立两视线段的同名关系,可直接生成三维线云或引导多视线段融合。该环节在多视线云重建中发展较为成熟。

早期线段匹配的研究中,根据使用的纹理或几何约束,可将算法分为两类。第一类将线段区域的纹理一致性作为匹配依据,不使用或较少使用线段之间的几何约束^[35-38]。此类方法与点特征匹配^[6]相似,时间复杂度一般为 $O(n^2)$ 。由于线段区域的纹理相对匮乏,其稳健性在大部分场景下低于同类型的点特征匹配算子。但在一些点特征匮乏的场景中可取得更优的匹配结果^[39]。基于纹理的线段匹配较多地使用在影像重叠度较高的 SLAM 或 SfM(structure from motion)场景中,可基本满足构图需求。第二类联合多条线段恢复影像之间的局部几何变换,并利用几何变换的一致性进行匹配检验^[40-44]。邻近线段的编组与匹配的过程实际上构建了一个邻接图:节点为候选匹配,边为邻近候选匹配之间的几何约束。所以包含邻近几何约束的匹配方法通常伴随着图优化策略^[45],从全局或半全局最优的角度剔除误匹配。局部仿射或投影变换的高阶几何约束可以带来较为稳健的匹配结果。但是,此类算法在无先验信息时效率较低,时间复杂度最高可达 $O(n^5)$ 。

随着点特征匹配与稳健估计^[46]的快速发展,影像位姿的获取变得简便高效。在此背景下,线段的纹理与几何特征逐渐联合起来进行匹配。常见的方法是在纹理匹配中使用线段端点构造核线区间约束^[15,37,47]。此类几何约束较为宽松,在稍宽基线的场景中存在较多错误匹配。因此,有学者引入更加严格的共面约束。虽然具体方法存在差异,但其核心都在于恢复局部映射关系,如仿射变换^[48-52]或投影变换^[42-43,53];其目的都在于根据局部几何一致性确定同名线元,或基于几何约束纠正局部纹理^[4,52,54]提高精度。此类方法假设三维场景可分解为局部平面,大部分人工场景均可满足该要求。由于平面投影可将待匹配线段的搜索范围缩小至若干像元的宽度,此类算法在精度上具有较大提升。然而,由于缺少先验平面信息,需要对局部线元进行穷举编组与检验。这一过程使算法的计算量呈

指数增长。前人提出了一系列降低复杂度的策略,其中,使用点特征匹配作为先验引导的方法最为常见;利用点线几何不变性进行联合检验^[28,55-56],或使用点特征构造平面^[57]。笔者将交叉线与点特征引导相结合,使用深度约束减少候选匹配的搜索范围,将算法的时间复杂度降低至 $O(n^3)$,可在 1 s 之内稳健匹配万级数量的线段^[16]。

1.2 多视同名线段关联

线段匹配仅建立了两张影像之间的线段同名关系,多视影像中还需要将多个匹配结果进行串联合并,以建立多视线段与物方线段的“多对一”关系。多视线段关联相较于点特征关联更加复杂,为了发挥线云的重建优势,既要求三维线特征几何结构的完整性,也要求其语义表达的唯一性。如房屋的一条直线轮廓应该只用一条直线段来表达。相比之下,点云本身使用集合来表达场景信息,对关联的精度要求相对较低。虽然已有较多的多视线云重建算法,多视线段关联的研究仍处于发展阶段,这也是制约线云应用的重要因素。

多视线段关联在像方或物方空间中进行。在像方空间中,通过后方交会将三维线段投影至其他影像,根据投影线段与影像线段之间的几何或纹理约束,将满足阈值的线段进行关联^[4,16,42,47]。在像方空间中可以简单地确定关联阈值;因为无论是方向还是距离都具有明确的角度与像元单位。然而,影像层面的融合丢失了物方深度信息,容易带来错误关联。此外,单一阈值存在欠融合与过融合的矛盾。近年来,物方空间中的线段关联^[15,32]取得了较好的效果。此类方法计算出三维线段之间的距离与方向,并进行关联判断。由于很多空三场景使用了相对的物方距离,不能直接以米或厘米为单位设定阈值。因此,首先在像方空间中进行若干像元的平移,再计算出特定深度下对应像方平移的物方距离,以此作为线段的关联阈值。此类方法在引入深度信息的同时,使用像元阈值控制物方线段关联,相比影像空间中的关联方式更加稳健。

当前线云重建存在欠关联与过关联的问题,其主要原因在于单一阈值的关联约束难以克服两类错误的矛盾。多视重建中,影像存在分辨率、深度范围、局部纹理等差异,影响解算的位姿精度。即使同名线段之间也存在不同的拟合误差,影响其交会精度。因此,多视线段在三维空间中的误差也具有多样性,需要建立自适应阈值的线段关联方法,降低两类错误。如图(3)所示,笔者团队利用空三连接点,模拟线段前方交会的误差分布,建立线段

前方交会的误差先验概率。不同的影像组合具有不同的误差模型,以充分利用连接点所隐含的多视误差信息。对于每一组潜在的多视关联线段,在随机分布假设下,计算出不同阈值的关联概率。概率

越低则表明该事件越不可能随机发生。因此,选取最低概率所对应的线段关联阈值。图3试验表明,这是控制多视线段关联两类错误的有效途径。

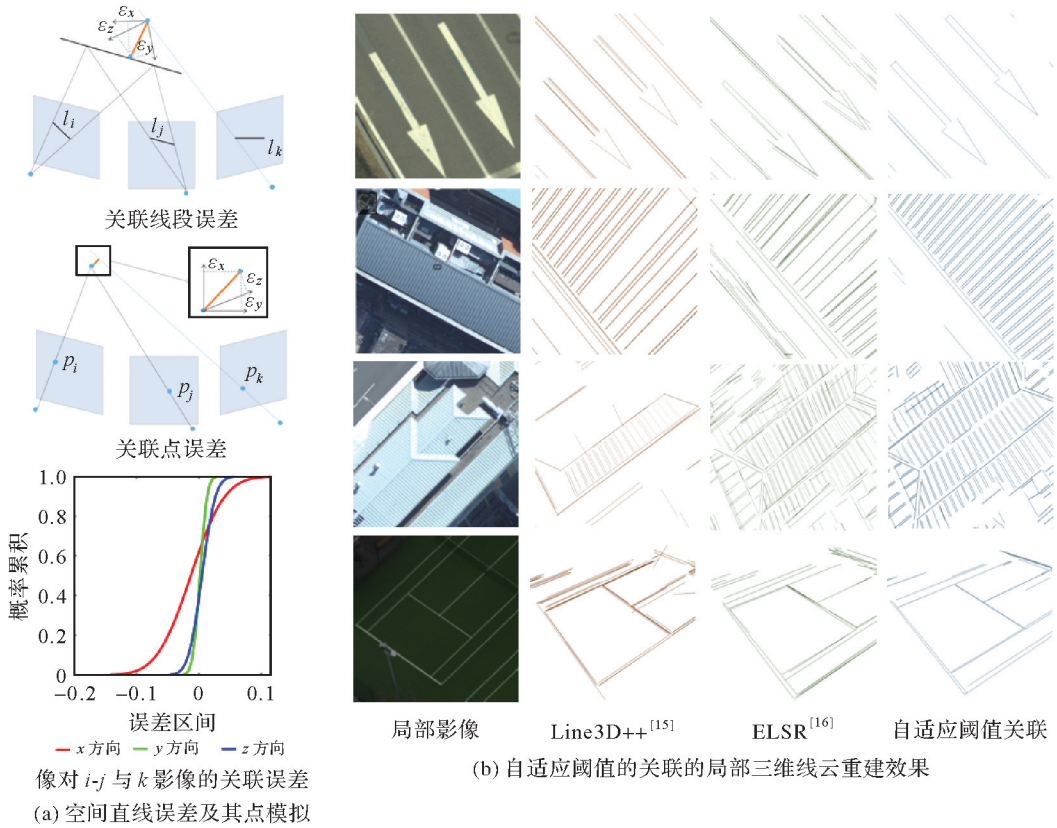


图3 多视线段关联的误差模拟与局部关联效果

Fig. 3 The error simulation of multi-view line segment association and the local association effect

1.3 多视线段前方交会

多视线段的前方交会在线段关联的基础上进行,由成像中心与影像线段构建的多个平面相交求解,其目的在于获得准确的三维线段。整体框架可大致分为两类。第一类针对阈值较为严格的关联结果,在三维空间中直接拟合^[27];或基于更加严格的后方交会模型,迭代平差得到优化的三维线段^[4,15,32]。另一类从两视线段匹配中重建三维线段,然后根据线段的几何一致性投票选择最优的代表线段^[16]。虽然对比第一类方法仅能获得次优定位精度,但受匹配与特征关联中的粗差影响较小,兼顾了重建效率与质量,适合较为宽松的匹配与关联约束。

多视线段的前方交会相比点特征更加复杂。当线段靠近核面时(图4(a)中红色线段对应的核面夹角小于 30°),可能产生较大的交会误差,使线段定位精度不准确^[58]。虽然学者针对此问题提出了不同的解决方案,但其基本思想一致:联合几何信

息与后方交会误差构建优化函数,而不局限于线段本身误差模型的探索。其中,线段之间的共面关系可成为有效的几何约束。如,搜索离核面较远的邻近线段,基于共面约束联合求解三维线段^[25];也有研究根据重建的三维线段进行平面编组与拟合,再将获得的线段编组投影至拟合平面而得到三维线段^[47]。

近年来,有研究使用深度学习的方法,基于三维直线的方向进行平面检测与编组,并利用编组的平面关联进行前方交会^[30]。该方法能得到视觉上较为规整的线云结构,但实际定位精度受共面阈值与场景结构的影响较大。文献[30]提出了两种思路优化线段的前方交会:第一种引入灭点的交会约束纠正线段误差,该方法仍然基于线段之间的共面关系,但可以直接使用已有的灭点检测算法进行线段编组;第二种利用深度学习方法来匹配线段上的同名点,由于同名点的交会仅在靠近核线时失效,可以提供较为稳健的位置约束。此外,笔者团队在

优化过程中利用线段之间的线-面几何结构关系(图 4(b)),将结构一致性作为优化目标,而将后方

交会误差作为非线性约束,取得了一定的效果(图 4(c))。

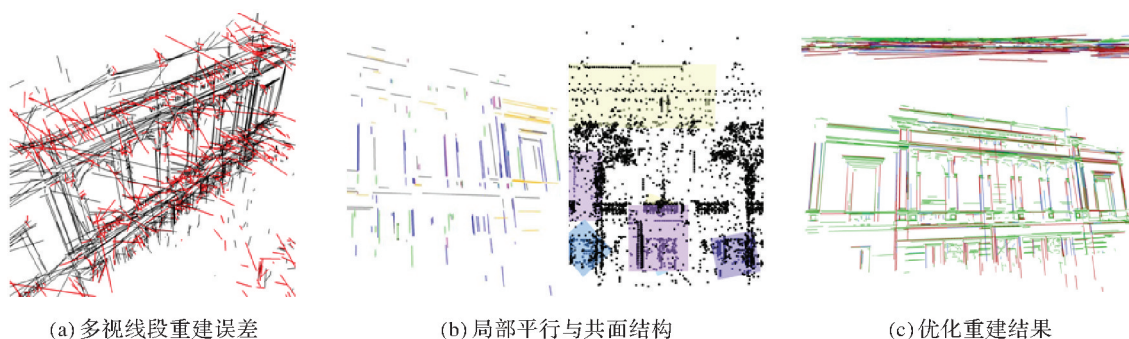


图 4 结构引导的多视线段重建优化

Fig. 4 Structural-guided optimization for multi-line segment reconstruction

2 基于线云的实景三维重建

图 5 列举了线云作为基础特征在实景三维中的

部分应用。线云对于丰富实景三维的结构基元,克服单一点云的重建瓶颈,进行高精度结构化建模等方面具有很大潜力。

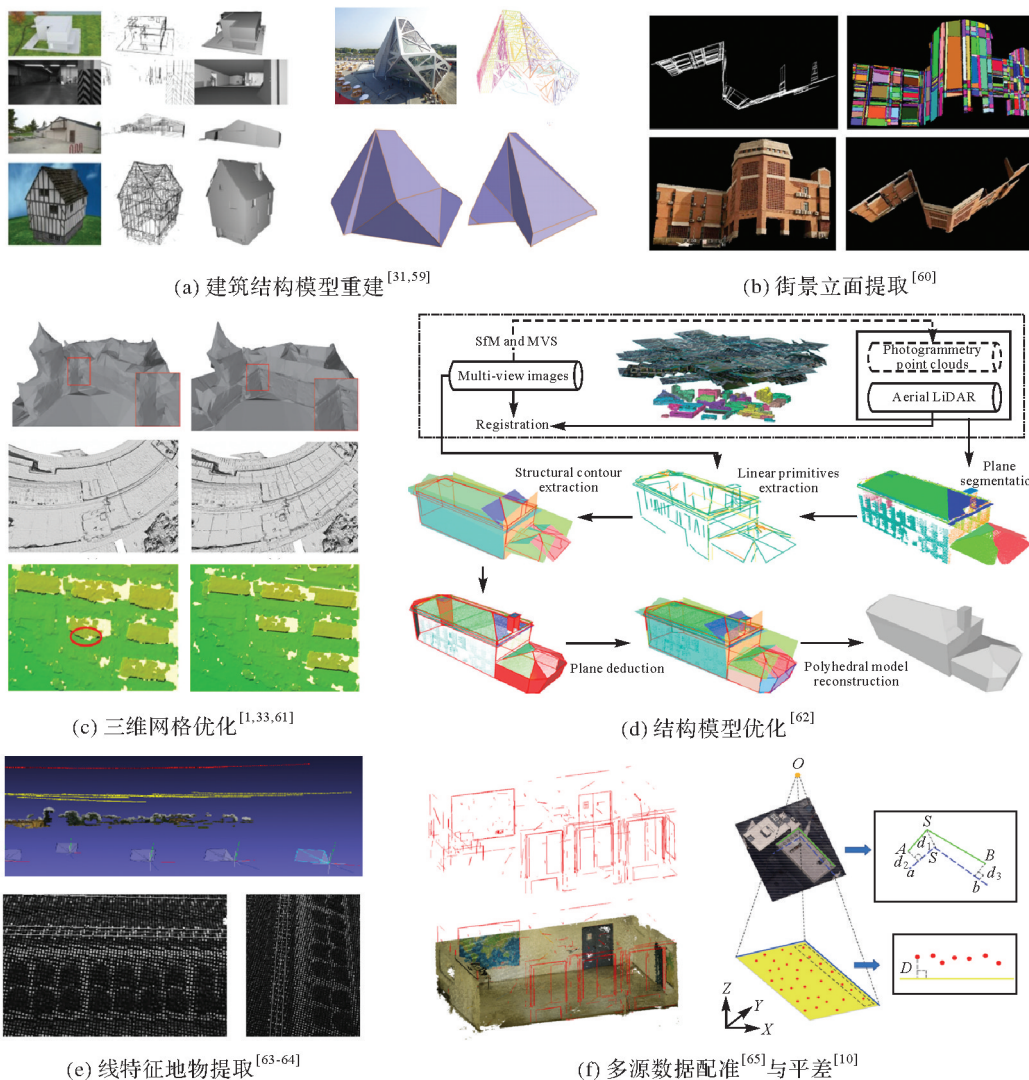


图 5 线云应用示例

Fig. 5 The examples of 3D line cloud application

2.1 结构化实景三维模型

相比多视密集点云,线云具有重建速度快、边界信息明确等优点;仅需两条线段就可附加约束得到平面结构,3条线段即可表达两个相交平面。因此,利用线云进行结构化重建的优势在于快速准确地恢复场景平面结构。文献[59]针对线云设计了RANSAC平面提取策略,在抽样与内点评估中加入了严格的几何约束。文献[31,60]采用从局部到全局的线段生长策略进行平面检测,可以利用线云的边界约束来控制平面生长过程。获取平面结构后,基于平面的相交、闭合与流形等几何约束,建立优化目标函数,得到场景的三维模型;此步骤与点云模型重建方法^[61]相同。街景两旁的建筑物立面轮廓适合使用线-面结构表达;因此,利用共面、平面夹角等先验引导,进行凹凸边界识别,可以快速获取以线-面形式表达的完整结构,克服建筑立面的弱纹理问题^[62]。在结合灭点的立面重建中^[63],立面影像通常仅能得到两个方向的灭点,缺乏深度方向约束,存在自由度和解算不严密的问题,因此,基于空间直线约束联合广义点平差,能够优化影像的外方位元素。

2.2 点线联合的模型优化

线云可以作为三维重建的约束与辅助结构。其重建约束主要体现在对模型边界的精度控制上。受制于成像原理与传感器精度,密集匹配或激光点云在建筑物边缘存在结构缺失或定位不准的难题,影响其重建精度与后续算法的效果。建筑物边缘具有明显的线性几何结构,可以提取出丰富的线云,获得准确的边缘信息。因此,使用线云约束点云,构建场景边缘结构以提高模型的精度与完整度,是点线混合重建的常见策略。如,将线云与点云联合进行三角网构建,利用其边界约束得到更加准确的三维网格^[1,64-65];或者使用线云构建平面约束,优化数字表面模型深度不连续的边界^[33,66];在点云不足的情况时,还可以作为重要的补充元素,提升模型表达效果^[67]。也可以利用其拓扑信息约束点云平面相交的边界,判断与修复结构化过程中存在的拓扑错误^[68]。为了有效利用不同传感器或不同视角获取的点云数据,以提升三维模型的完整性,需要对不同坐标系下的点云进行配准。相比于点云,从线云中可以更加便捷地提取出场景轮廓结构;通过对不同场景的三维线段之间构建距离与方向的能量函数,进行优化求解,可对不同物方坐标系的点云进行配准^[69-70]。此外,利用影像获取的线云与LiDAR点云构建的平面距离作为约束,进行

光束法平差,也可以有效提升影像点云与激光点云的配准精度^[10]。

2.3 线状地物特征重建

实景三维中存在典型的线状地物特征,如铁路钢轨线、电力线等。因为生成的点云在边缘处存在缺失与噪声,所以仅通过点云的重建方法对于线性结构恢复不佳。多视线云重建既是此类特征的获取手段,也是其几何结构的表达。因此,在表达精细、狭长结构方面具有独特的优势,能够描述底层几何的拓扑和连接信息,融合线云与点云的线状特征重建可以更精确地重建和保留其细微结构。铁路在站测绘中,无人机航测成本低廉、机动灵活且不受列车运行天窗时间限制。从无人机影像上提取钢轨线特征,并采用线段匹配与基于物方距离测度的重建优化方法,可以得到满足工程应用的高精度三维钢轨线^[71];相较于传统测绘手段,能大幅提高项目进展。基于无人机的电力线智能化检测需要对巡航线路进行自动规划^[72]。区别于影像的二维电力线检测,多视影像的三维电力线制图可为其自动巡航提供更优的参考,同时也能丰富实景三维模型的线状地物特征。与基于LiDAR点云的电线制图相比,多视影像制图仅需搭载可见光传感器,具有较低的成本优势与续航优势,因此获得了一定的关注^[73-74]。需要强调的是,线云并不是替代点云在线状地物特征中的作用,而是提供结构化三维信息,约束与补充点云信息,提升实景三维的重建效果。

3 智能化测绘中的线云研究方向

在前人努力下,线云重建取得了较大的进展。然而,线云在实景三维建设中的发展较为滞后,主要难点在于两个方面:①线云的重建技术亟须进一步完善。由于影像直线的完整性、直线匹配的准确性与多视融合的可靠性都处于提升阶段,线云存在几何结构欠完整、语义信息不充足的问题。虽然线段具有丰富的语义属性,如房屋轮廓、平面、铁路、立面、道路线等,但是当前研究侧重几何结构,对其语义属性的研究尚不充分。②线云的应用场景亟须进一步拓展。利用点线特征进行联合重建时,涉及多元特征误差不确定性处理与特征信息的量化表达,以建立统一的处理与优化框架;这极大地增加了算法的理论与计算复杂度。因此,当前的线云通常作为几何约束,一方面为点云与影像等多源异构数据提供配准基元,另一方面辅助点云进行多

源数据融合与结构化重建,但线云的结构优势与点云的细节描述缺乏深度融合。

随着数字化测绘技术的“红利”用尽,从数字化走向智能化是当前测绘技术转型和升级的基本方向^[8]。线云作为实景三维中的基础特征,需要在智能化测绘的指导下明确发展方向。线云的重建与应用对象为纷繁多样的人工设施,实际上已经无法以通用的数学模型进行处理或表达。因此,需要将

测绘自然智能与通用人工智能相结合,建立混合计算模式,促进线云的发展。如图 6 所示,区别于传统直接由三维特征到实景三维的建设模式,需要在两者之间加入智能化建设与服务体系,使线云在实景三维重建中由“怎么做”向“做得好”转变,使实景三维成果反哺线云重建技术,让线云从“能用”向“好用”发展。对此,笔者从线云的智能化重建与应用进行展望。

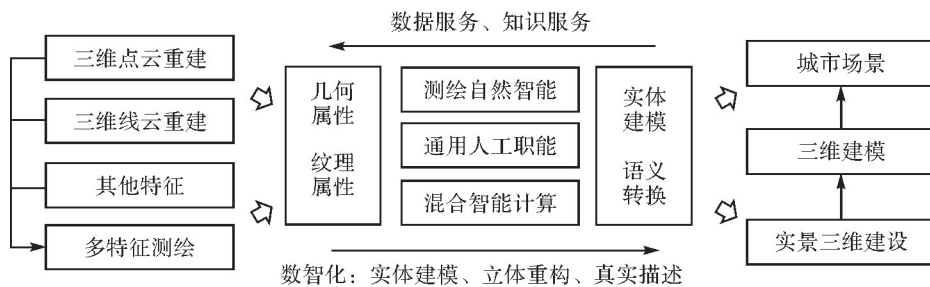


图 6 智能化测绘中的线云重建与应用

Fig. 6 Line cloud reconstruction and application mode in intelligent surveying and mapping

3.1 线云的智能化重建

引入测绘自然智能^[8],实现混合智能计算^[75],使线云结构更完整,语义更准确,是当前线云重建发展的主要方向。建立线云的几何语义协同关联机制,是完善其几何语义的出发点。因为线段自身具有明确的语义和几何信息,且两者相互关联。若能准确识别出线段语义,可以联合测绘自然智能,完善线云的几何结构。如,利用深度学习等通用人工智能对电力线或铁轨线进行识别后,即可将邻近的共线线段进行合并,解决线段提取不完整造成的线云断裂。反之,得到线云的几何结构后,可以根据测绘自然智能,归纳线段语义特征之间的平行、共线与共面几何关系,提升线云的语义精度。线特征的几何与语义关联机制还蕴含了其唯一性的内在要求,如,一根水平的电力线应该仅使用一条直线表达。因此,提高多视线段的关联精度,控制单一融合阈值带来的过融合与欠融合两类错误,减少线云的重复与冗余,是线云重建的内在要求。这需要对线云重建过程进行智能解析与建模,将深度学习方法的语义提取优势与多视几何结构的经验表达相结合,建立起自底向上的抽象与自顶向下的互补体系,优化线云的几何语义。

发挥群体智能,构建专业的数据集与科学的量化指标,进行客观准确的重建评价,可以极大地提升线云重建质量。当前线云的质量评估基于点云构建的三维模型,在物方空间中计算端到三维网

格的距离,并将给定距离阈值内的线段作为正确线云,以计算重建的正确率,并将线云数量作为近似召回率的评价指标。然而,此类评价策略受阈值影响,缺乏客观性;此外,线云数量的增加可能来自多视关联错误造成的冗余线段。因此,已有的线云评价方法与数据集都难以满足客观评价的需求。针对不同的应用场景,构建具有线云真值的数据集与评价策略,需要测绘学者的共同努力,如图 7 所示,探索利用 Blender、Unity 等三维渲染引擎,利用众包众创所得到的海量结构化三维模型,进行三维线云几何语义特征的逆向重构与渲染,是利用群体智能的有效方案。

3.2 线云的智能化应用

让线云与点云相辅相成,共同推进实景三维的发展,其关键在于探索两者深度融合的智能化测绘技术。围绕其独特优势,可以从 4 个层面深化线云特征在实景三维中的应用:①提升几何处理精度。线云可以为多源异构数据配准提供准确的同名特征基元,如激光点云与航空影像/卫星影像异构数据配准、航空与地面影像匹配等难点,利用线云特征有望解决异构数据信息不平衡、超大视角差异等造成的同名特征难匹配问题。②优化三维模型的精度。研究先进的点云与线云融合算法,将线云的结构优势与点云的细节优势结合,实现更加精细、准确的三维模型重建,满足更高标准的实景三维需求。③提升重建效率。结合线云数据与空中三角

测量连接点,探索局部场景复杂度的描述方法;在简单场景中,利用线云与稀疏点云,进行快速地平面拟合,以高效地重建出局部的三维结构,避免耗时的密集匹配,提升重建效率。面对复杂场景时,再引入密集匹配的点云数据进行精细重建,确保模型质量。④拓展实景三维服务的应用范围。与密

集点云相比,线云在存储和传输方面更具优势,能显著降低存储需求;与结构化模型相比,线云获取更便捷、成本更低,且能保留丰富的几何信息;这些优点使线云在自动驾驶、视觉定位等实景三维服务领域有着巨大潜力。

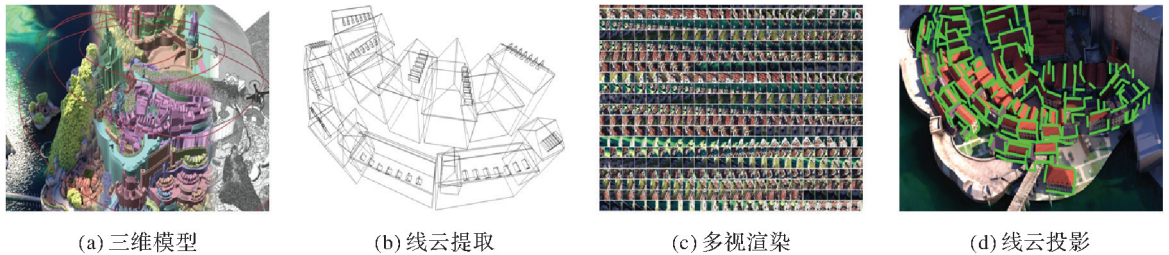


图7 利用众包数据构建线云重建评估数据集

Fig. 7 Using crowdsourced data for evaluating line cloud reconstruction

点-线几何与语义特征的融合应用有助于获取语义丰富、结构准确的实景三维模型。在此基础上进行深度归纳与学习,对模型蕴含的空间结构和几何特征进行提取与分析,从而发现线云重建中的几何语义协同机制。不仅有助于理解线云在三维场景表达中的几何语义特性,而且能够反过来指导线云重建技术的优化。如,学习三维模型中线云的分布、走向及相互关系,利用通用人工智能方法从结构化模型中提炼线云的关键特征;结合专家测绘知识,归纳其几何语义的图关联结构与关联参数,可以直接应用于后续的点云数据处理中,优化三维重建效果。在此迭代应用的框架下,随着线云数据的不断积累和三维结构的持续优化,线云重建技术也将不断进化,更好地服务于各种智能化应用。线云与实景三维的迭代提升,是线云智能化重建与应用的核心所在。

4 结束语

三维线云的重建与应用具有悠久的发展历史,其结构与语义优势可以弥补点云不足,有效服务于实景三维的建设。然而,当前多视线云重建的几何结构,融合精度和语义信息提取上都有较大的提升空间。本文以“数智化测绘”为指导,在线云重建上提出充分利用深度学习技术的发展,探索几何语义协同重建的思路,通过众包智能构建有效的线云重建评估方法与数据集;在线云应用上认为点云线云应互为补充,优化实景三维重建与服务;并结合通用人工智能与测绘自然智能等方法,实现线云重建与应用的迭代提升。可以预见的是,不断改进线云重建效果,提供几何与语义更加完备的线云,可以丰富实景三维建设的基础特征,优化实景三维建设方案,为实景三维成果的服务提供更加完善的方法与创新的思路,助力智能化测绘技术转型和升级。

参考文献

- [1] SUGIURA T, TORII A, OKUTOMI M. 3D surface reconstruction from point-and-line cloud[C]//Proceedings of 2015 International Conference on 3D Vision. [S.l.]: ACM Press, 2015: 264-272.
- [2] ZHANG Zhengyou. Token tracking in a cluttered scene[J]. Image and Vision Computing, 1994, 12(2): 110-120.
- [3] MEDIONI G, NEVATIA R. Segment-based stereo matching[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 31(1): 2-18.
- [4] SCHMID C, ZISSERMAN A. Automatic line matching across views[C]//Proceedings of 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan: IEEE, 1997.
- [5] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of 1988 Alvey Vision Conference. Manchester: Alvey Vision Club, 1988.
- [6] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [7] SUN Jianming, SHEN Zehong, WANG Yuang, et al. LoFTR: Detector-free local feature matching with transformers[C]//Proceedings

- of 2021 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Virtual; CVPR, 2021.
- [8] 陈军, 刘万增, 武昊, 等. 智能化测绘的基本问题与发展方向[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 995-1005. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2021. 20210235.
CHEN Jun, LIU Wanzeng, WU Hao, et al. Smart surveying and mapping: fundamental issues and research agenda[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(8): 995-1005. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2021. 20210235.
- [9] 陈军, 田海波, 高崑, 等. 实景三维中国的总体架构与主体技术[J/OL]. 测绘学报: 1-20. [2024-06-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2089.P.20240417.0946.002.html>.
CHEN Jun, TIAN Haibo, GAO Yin, et al. China's national 3D mapping program (3dRGLM): overall architecture and key technological issues[J/OL]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica: 1-20. [2024-06-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2089.P.20240417.0946.002.html>.
- [10] 王广帅, 万一, 张永军. 交叉点结构特征约束的机载 LiDAR 点云与多视角航空影像配准[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(9): 1868-1877.
WANG Guangshuai, WAN Yi, ZHANG Yongjun. Registration of airborne LiDAR data and multi-view aerial images constrained by junction structure features[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(9): 1868-1877.
- [11] 唐敏, 张祖勋, 张剑清. 基于广义点理论的多基线影像钣金件 3D 重建与尺寸检测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(12): 1095-1098, 1134.
TANG Min, ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing. 3D reconstruction and inspection of industrial sheet metal parts with multiple baseline images based on generalized point photogrammetry theory[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(12): 1095-1098, 1134.
- [12] 张永军. 基于广义点摄影测量的圆和圆角矩形三维重建[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(1): 136-140.
ZHANG Yongjun. Reconstruction of circles and round rectangles by generalized point photogrammetry[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(1): 136-140.
- [13] 张祖勋, 张剑清. 广义点摄影测量及其应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(1): 1-5.
ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing. Generalized point photogrammetry and its application[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(1): 1-5.
- [14] ZHANG Zuxun, ZHANG Yongjun, ZHANG Jianqing, et al. Photogrammetric modeling of linear features with generalized point photogrammetry[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 74(9): 1119-1127.
- [15] HOFER M, MAURER M, BISCHOF H. Efficient 3D scene abstraction using line segments[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2017, 157(3): 167-178.
- [16] WEI Dong, WAN Yi, ZHANG Yongjun, et al. ELSR: efficient line segment reconstruction with planes and points guidance[C]//Proceedings of 2022 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New Orleans; IEEE, 2022.
- [17] CONNETTE C P, MEISTER O, HAGELE M, et al. Decomposition of line segments into corner and statistical grown line features in an EKF-SLAM framework[C]//Proceedings of 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego; IEEE, 2007.
- [18] LEMAIRE T, LACROIX S. Monocular-vision based SLAM using line segments[C]//Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome; IEEE, 2007.
- [19] QIAO Chengyu, BAI Tingming, XIANG Zhiyu, et al. Superline: a robust line segment feature for visual SLAM[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Intelligent Robots and Systems. Prague; IEEE, 2021.
- [20] ZHANG Yongjun, WEI Dong, LI Yansheng. AG3line: active grouping and geometry-gradient combined validation for fast line segment extraction[J]. Pattern Recognition, 2021, 113: 107834.
- [21] PAUTRAT R, BARÁTH D, LARSSON V, et al. DeepLSD: line segment detection and refinement with deep image gradients[C]//Proceedings of 2022 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New Orleans; IEEE, 2022.
- [22] AKINLAR C, TOPAL C. Edlines: real-time line segment detection by edge drawing (ed)[C]//Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Image Processing. Brussels; IEEE, 2011.
- [23] VON GIOI R G, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(4): 722-732.
- [24] ALMAZAN E J, TAL R, QIAN Yiming, et al. MCMLSD: a dynamic programming approach to line segment detection[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu; IEEE, 2017.
- [25] OK A Ö, WEGNER J D, HEIPKE C, et al. Accurate reconstruction of near-epipolar line segments from stereo aerial images[J]. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 2012, 2012(4): 345-358.
- [26] 陈军, 刘建军, 田海波. 实景三维中国建设的基本定位与技术路径[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1568-1575.
CHEN Jun, LIU Jianjun, TIAN Haibo. Basic directions and technological path for building 3D realistic geospatial scene in China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1568-1575.
- [27] JAIN A, KURZ C, THORMÄHLEN T, et al. Exploiting global connectivity constraints for reconstruction of 3D line segments from

- images[C]//Proceedings of 2010 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco:IEEE ,2010.
- [28] RAMALINGAM S, ANTUNES M, SNOW D, et al. Line-sweep: cross-ratio for wide-baseline matching and 3D reconstruction[C]//Proceedings of 2015 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston:IEEE,2015.
- [29] LI Kai, YAO Jian. Line segment matching and reconstruction via exploiting coplanar cues[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 125: 33-49.
- [30] WANG Wei, GAO Wei, CUI Hainan, et al. Reconstruction of lines and planes of urban buildings with angle regularization[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 165: 54-66.
- [31] GUO Jianwei, LIU Yanchao, SONG Xin, et al. Line-based 3D building abstraction and polygonal surface reconstruction from images [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024,3(18): 1-15.
- [32] LIU Shaohui, YU Yifan, PAUTRAT Remi,et al. 3D Line mapping revisited[C]//Proceedings of 2023 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Vancouver:IEEE 2023.
- [33] FANG Tong, CHEN Min, HU Han, et al. 3D line segment reconstruction with depth maps for photogrammetric mesh refinement in man-made environments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 3332211.
- [34] 张永军, 张祖勋, 龚健雅. 天空地多源遥感数据的广义摄影测量学[J]. 测绘学报, 2021, 50(1): 1-11. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2021. 20200245.
- ZHANG Yongjun, ZHANG Zuxun, GONG Jianya. Generalized photogrammetry of spaceborne, airborne and terrestrial multi-source remote sensing datasets[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(1): 1-11. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2021. 20200245.
- [35] BAY H, FERRARI V, GOOL L. Wide-baseline stereo matching with line segments[C]//Proceedings of 2005 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Colorado:IEEE, 2005.
- [36] 王志衡, 吴福朝. 均值-标准差描述子与直线匹配[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(1): 32-39.
- WANG Zhiheng, WU Fuchao. Mean-standard deviation descriptor and line matching[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2009, 22(1): 32-39.
- [37] WANG Zhiheng, WU Fuchao, HU Zhanyi. MSLD: a robust descriptor for line matching[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(5): 941-953.
- [38] KIM H, LEE S, LEE Y. Wide-baseline stereo matching based on the line intersection context for real-time workspace modeling[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(2): 421-435.
- [39] LÓPEZ J, SANTOS R, FDEZ-VIDAL X R, et al. Two-view line matching algorithm based on context and appearance in low-textured images[J]. Pattern Recognition, 2015, 48(7): 2164-2184.
- [40] ZHANG Lilian, KOCH R. An efficient and robust line segment matching approach based on LBD descriptor and pairwise geometric consistency[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(7): 794-805.
- [41] AL-SHAHRI M, YILMAZ A. Line matching in wide-baseline stereo: a top-down approach[J]. IEEE Transactions Image Process, 2014, 23(9): 4199-4210.
- [42] WEI Dong, ZHANG Yongjun, LIU Xinyi, et al. Robust line segment matching across views via ranking the line-point graph[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 171: 49-62.
- [43] WEI Dong, ZHANG Yongjun, LI Chang. Robust line segment matching via reweighted random walks on the homography graph[J]. Pattern Recognition, 2021, 111: 107693.
- [44] LOURAKIS M I A, HALKIDIS S T, ORPHANOUDAKIS S C. Matching disparate views of planar surfaces using projective invariants [J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(9): 673-683.
- [45] CHO M, LEE J, LEE K M. Reweighted random walks for graph matching[C]//Proceedings of 2010 European Conference on Computer Vision. Hersonissos:IEEE, 2010.
- [46] BARATH D, NOSKOVA J, IVASHECHKIN M, et al. MAGSAC++, a fast, reliable and accurate robust estimator[C]//Proceedings of 2020 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle:IEEE, 2020.
- [47] LI Kai, YAO Jian, LI Li, et al. 3D line segment reconstruction in structured scenes via coplanar line segment clustering[C]//Proceedings of 2017 Asian Conference on Computer Vision. Cham: Springer, 2017: 46-61.
- [48] 宋伟东, 朱红, 王竞雪, 等. 多重约束下的近景影像线特征匹配方法[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(6): 764-770.
- SONG Weidong, ZHU Hong, WANG Jingxue, et al. Line feature matching method based on multiple constraints for close-range images[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(6): 764-770.
- [49] WANG Qiang, ZHANG Wei, LIU Xiaolong, et al. Line matching of wide baseline images in an affine projection space[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(2): 632-654.
- [50] 严少华, 陈敏, 赵怡涛, 等. 局部结构约束下的宽基线影像直线特征匹配[J]. 测绘通报, 2020(5): 51-54.
- YAN Shaohua, CHEN Min, ZHAO Yitao, et al. Local structure based line segment matching for wide-baseline images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(5): 51-54.
- [51] CHEN Min, YAN Shaohua, QIN Rongjun, et al. Hierarchical line segment matching for wide-baseline images via exploiting viewpoint robust local structure and geometric constraints[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 181: 48-66.

- [52] CHEN Min, LI Wen, FANG Tong, et al. An adaptive feature region-based line segment matching method for viewpoint-changed images with discontinuous parallax and poor textures[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 117: 103209.
- [53] LI Kai, YAO Jian, LU Xiaohu, et al. Hierarchical line matching based on line-junction-line structure descriptor and local homography estimation[J]. *Neurocomputing*, 2016, 184: 207-220.
- [54] OK A O, WEGNER J D, HEIPKE C, et al. Matching of straight line segments from aerial stereo images of urban areas[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 74: 133-152.
- [55] FAN Bin, WU Fuchao, HU Zhanyi. Line matching leveraged by point correspondences[C]//Proceedings of 2010 Conference on Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco:IEEE, 2010.
- [56] FAN Bin, WU Fuchao, HU Zhanyi. Robust line matching through line-point invariants[J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(2): 794-805.
- [57] SUN Yanbiao, ZHAO Liang, HUANG Shoudong, et al. Line matching based on planar homography for stereo aerial images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 104: 1-17.
- [58] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision [M]. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [59] LANGLOIS P A, BOULCH A, MARLET R. Surface reconstruction from 3D line segments[C]//Proceedings of 2019 International Conference on 3D Vision. Québec City:IEEE, 2019.
- [60] WITT J, MENTGES G. Maximally informative surface reconstruction from lines[C]//Proceedings of 2014 International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong:IEEE, 2014.
- [61] NAN Liangliang, WONKA P. PolyFit: polygonal surface reconstruction from point clouds[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice:IEEE, 2017.
- [62] 王伟, 于磊, 任国恒, 等. 城市建筑立面三维“线-面”结构快速重建[J]. *电子学报*, 2021, 49(8): 1551-1560.
WANG Wei, YU Lei, REN Guoheng, et al. Rapidly reconstructing 3D line-plane structures of urban building facades[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(8): 1551-1560.
- [63] 李畅. 城市街道立面自动重建关键技术研究[J]. *测绘学报*, 2011, 40(2): 268.
LI Chang. Researching on key technique for 3D auto-reconstruction of city street elevation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(2): 268.
- [64] ZHOU Ying, WANG Lingling, LOVE P, et al. Three-dimensional (3D) reconstruction of structures and landscapes: a new point-and-line fusion method[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 42: 100961.
- [65] LI Shiwei, YAO Yao, FANG Tian, et al. Reconstructing thin structures of manifold surfaces by integrating spatial curves[C]//Proceedings of 2018 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City:IEEE, 2018.
- [66] QIN Rongjun, CHEN Min, HUANG Xu, et al. Disparity refinement in depth discontinuity using robustly matched straight lines for digital surface model generation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(1): 174-185.
- [67] HOFER M, MAURER M, BISCHOF H. Improving sparse 3D models for man-made environments using line-based 3D reconstruction [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on 3D Vision. Tokyo:IEEE, 2014.
- [68] LIU Xinyi, ZHANG Yongjun, LING Xiao, et al. TopoLAP: topology recovery for building reconstruction by deducing the relationships between linear and planar primitives[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1372.
- [69] KAISER T, CLEMEN C, MAAS H G. Automatic co-registration of photogrammetric point clouds with digital building models[J]. *Automation in Construction*, 2022, 134: 104098.
- [70] LING Xiao, QIN Rongjun. A graph-matching approach for cross-view registration of over-view and street-view based point clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 185: 2-15.
- [71] 王广帅. 无人机倾斜摄影铁路轨道线高精度自动重建[J]. *测绘通报*, 2022(5): 133-139, 156.
WANG Guangshuai. High-precision automatic reconstruction of railway line with UAV oblique photography[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(5): 133-139, 156.
- [72] XU Chang, LI Qingwu, ZHOU Qingkai, et al. Power line-guided automatic electric transmission line inspection system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-18.
- [73] PASTUCHA E, PUNIACH E, SCISLOWICZ A, et al. 3D reconstruction of power lines using UAV images to monitor corridor clearance[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3698.
- [74] GANOVELLI F, MALOMO L, SCOPIGNO R. Reconstructing power lines from images[C]//Proceedings of 2018 International Conference Image and Vision Computing New Zealand. New Zealand:IEEE, 2018.
- [75] 陈军, 艾廷华, 同利, 等. 智能化测绘的混合计算范式与方法研究[J/OL]. *测绘学报*: 1-19[2024-06-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2089.P.20240415.1049.002.html>.
CHEN Jun, AI Tinghua, TONG Li, et al. Hybrid computational paradigm and methods for intelligentized surveying and mapping[J/OL]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*: 1-19[2024-06-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2089.P.20240415.1049.002.html>.

The technology and intelligent development of 3D line cloud reconstruction from multiple images

WEI Dong, LIU Xinyi, ZHANG Yongjun

School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: As a collection of line segments, 3D line clouds have distinct geometric structures and semantic information in each individual feature. They can serve as efficient guiding, controlling, and abstract representation elements in structured 3D reconstruction, compensating for the deficiencies in edge description and lack of initial structure in point clouds. These line clouds represent important structured features that can change the traditional “one-layer skin” 3D model (where different objects are mutually adherent, making spatial analysis and decision-making difficult). However, how to reconstruct useful line clouds from multi-view images and make effective use of them has always been a challenging problem in this field. This article reviews the development of 3D line clouds, introduces related reconstruction methods, and analyzes existing difficulties and shortcomings. Combining the background of transformation from digitization to intelligent surveying and mapping technology, it discusses the three questions of what to build, how to build, and how to use line clouds in real-world 3D scenarios. The article also introduces and prospects the intelligent development of line cloud reconstruction and application, hoping to provide a reference for researchers working on real 3D reconstruction and line clouds.

Key words: 3D line clouds; 3D realistic scene; 3D reconstruction; intelligent surveying and mapping; multiple images

Foundation support: The Youth Program of the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42301499; 42201474); China National Postdoctoral Programme for Innovative Talents under Grant (No. Bx20220241)

First author: WEI Dong (1992—), male, postdoctor, majors in 3D line cloud reconstruction and applied research.

E-mail: weidong@whu.edu.cn

Corresponding author: LIU Xinyi

E-mail: liuxy0319@whu.edu.cn