

文章编号 1004-924X(2021)05-0989-10

融合激光雷达与无人机的特大钢结构高精度测量

郭 明^{1,2,3}, 孙梦溪¹, 黄 明^{1,2,3}, 闫冰男¹, 周玉泉¹, 赵有山^{4*}

(1. 北京建筑大学 测绘与城市空间信息学院, 北京 100044;

2. 代表性建筑与古建筑数据库教育部工程研究中心, 北京 102616;

3. 自然资源部 城市空间信息重点实验室, 北京 102616;

4. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 为了实现对特大钢结构的高效率、高精度检测, 对地面激光点云整体配准算法以及无人机多视影像生成密集点云算法进行了研究。采用基于几何特征的可迭代整体配准算法不断对观测值进行约束定权和解算, 将观测值改正数误差控制在一定阈值范围内, 直到完成配准, 生成整个网架结构的激光雷达点云模型。以球节点多连杆中心点算法对网架结构中的球结点与柱进行偏心计算, 再使用基于视觉运动恢复结构算法以及改进的RANSAC算法生成的影像密集点云, 通过配准实现地面激光点云和高分辨率非量测影像数据的融合。以某亚洲最大跨钢结构高精度检测为例, 多站激光雷达点云整体的配准精度为 5 mm, 抽检的 21 根钢柱里 16 根柱子的偏差接近或大于 35 mm (32.1~68.2 mm, 方向均向外), 整体钢结构的网架挠度均小于 1/250。由此表明, 地面激光点云整体配准算法以及高分辨率非量测影像数据密集点云生成算法可行且准确, 能够满足特大钢结构的高精度检测要求。

关键词: 近景摄影测量; 激光雷达; 无人机; 钢结构检测; 点云

中图分类号: P225.2; P234.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212905.0989

High-precision measurement of steel structure based on LiDAR and UAV

GUO Ming^{1,2,3}, SUN Meng-xi¹, HUANG Ming^{1,2,3}, YAN Bing-nan¹,
ZHOU Yu-quan¹, ZHAO You-shan^{4*}

(1. School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Representative Architecture and Ancient Architecture Database Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing 102616, China;

3. Key Laboratory of Urban Spatial Information, Ministry of Natural Resources, Beijing 102616, China;

4. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

* Corresponding author, E-mail: yshzhao@163.com

Abstract: To achieve high-efficiency and high-precision detection of super-large steel structures, this

收稿日期: 2020-09-01; 修订日期: 2020-10-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41971350); 北京建筑大学金字塔人才培养工程建大杰青培养计划资助项目 (No. JDJQ20200307); 北京市未来城市设计高精尖创新中心资助项目 (No. UDC2019031724); 研究生创新项目 (No. PG2020082, No. PG2020075)

study investigates the overall registration algorithm for ground laser point clouds and the algorithm to generate dense point clouds from unmanned aerial vehicle multi-view images. First, the iterative global registration algorithm based on geometric features is used to weigh and solve the observed value constraints continuously. The error of the observed value corrections is controlled within a certain threshold range until the registration is complete and the LiDAR point cloud model of the entire grid structure is generated. Subsequently, the eccentricity between the spherical node and the column in the grid structure is calculated using the spherical node multi-link center point algorithm. The image dense point cloud generated using the visual structure from motion algorithm and improved RANSAC algorithm is used to realize fusion of the ground laser point cloud and high-resolution non-metric image data through registration. With the high-precision inspection of the largest-span steel structure in Asia taken as an example, the overall registration accuracy of the multi-station LiDAR point cloud is 5 mm, and the deviation of 16 of the 21 steel columns sampled is close to or greater than 35 mm (32.1-68.2 mm, all in the outward direction). Notably, the deflection of the overall steel structure grid is less than 1/250. The feasibility and accuracy of the entire registration algorithm for the ground LiDAR point cloud and the algorithm for generating high-resolution non-measurement image data-intensive point clouds are verified to fully meet the requirements of high-precision detection of super-large steel structures.

Key words: close-range photogrammetry; lidar; unmanned aerial vehicle; steel structure detection; point cloud

1 引言

近年来,随着现代建筑行业施工水平的发展,钢结构变得特大异形,结构复杂,如鸟巢国家体育场、天津西站等钢结构建筑。这些结构的变形监测难度很大,常规的无损检测方法有超声检测、射线检测和飞行时间衍射检测等方法。这些方法存在执行效率低、检测精度低等问题,且难以对特大钢结构进行整体定量的高精度检测。

激光雷达测量作为一种新兴技术,具有高效率、高分辨率、测量精度均匀和非接触等优势,并广泛应用于文化遗产保护^[1-2]、地形勘测^[3]等领域^[4-5]。但激光扫描点云存在扫描漏洞、疏密不均等异常现象。无人机在乡村实景测绘中^[6]发挥了重要作用,有效减少了外业工作量。利用无人机近景摄影测量生成密集点云的方法,实现多张多视影像生成的密集点云与地面 LiDAR 点云融合,得到精细的三维模型。激光雷达与小型无人机测量技术的结合将成为新时代大型结构检测的主要技术之一。

目前,国内外已经将激光雷达应用在建筑物监测中^[7]。特大钢结构建筑构件大都由平面、球

面和圆柱等基本要素组成,针对这类规则几何形体的建模,关键问题是复杂的旋转体的自动提取。目前,主要有贝叶斯采样一致性(Bayesian Sample Consensus, BaySAC)、RANSAC(Random Sample Consensus)算法并结合最小二乘法提取平面、圆、圆柱这类简单实体的几何特征^[8],但这些方法都存在鲁棒性差、计算复杂等缺点。在网架结构的球结点监测上,赵有山等使用三维激光扫描技术采集的非标准三维实体数据重构出实体线、面、体三维数据,探讨了在钢结构建筑整体变形监测方法的可行性^[9]。王国利等通过使用三维激光技术进行钢结构安装检测,采用平面交会法获得钢结构的角点特征,实现了平面特征的自动探测^[10]。在此基础上,李平等采用 NURBS 曲面构造法构建出点云数据三维模型,与原始点云通过“偏差分析”验证模型构建的精度^[11],但数据处理算法还不够成熟,自动化不高。王晏民等通过提取某箱型结构扫描数据的特征并与接口数据对比分析,快速精确地获取接口现状,能够有效指导实际施工^[12]。李少博等设计了基于反向法的气浮主轴回转误差测量方案和逐相位误差补偿方法,证明了该方法可用于球偏心

误差精度的检测,为进一步实现高精度球度测量奠定了基础^[13-14]。此类方法都需要计算法线,法线结果的好坏直接影响到后期的拟合。目前,还没有一种统一的方法来实现圆柱、圆锥、圆台或任意母线旋转体的识别算法,所提出的算法仅限于解决某一种旋转曲面的特征提取。

激光雷达和数字影像是最有效的三维数据获取手段。点云配准在整个数据处理环节中极为重要,精细三维模型的分辨率和精度均达毫米级甚至亚毫米级,为大跨钢结构的变形监测提供了有力的支撑。根据配准过程中基元选择的不同,现有算法可以分为基于点特征约束、基于直线特征约束、基于平面特征约束以及基于多特征联合约束的LiDAR点云配准算法等4类^[15]。最常见的多站配准方法是最近点迭代(Iterative Closest Point, ICP)算法。Li等通过最小二乘法进行最近点迭代,得出最优坐标变换^[16-17],在粗配准的基础上通过ICP算法对点云进行快速配准。此方法虽然速度快、耗时短,但对于大型复杂的网架点云来说实施相对困难,效率不高。还有一种方法是通过序列拼接进行站点配准。通过求取坐标转换参数实现两两站点的配准^[18],直到最后一站点云配准完成。这种方法存在一定的误差,最终导致拼接后的点云图出现裂缝或交叉的情况。盛业华等提出了一种多站扫描之间的无缝拼接方法^[19-20],按照扫描站的顺序,依次根据相邻站的重叠区域的相同标志点建立坐标转换模型,实现了多站点云的无缝拼接。用这种方法处理点云不需要将点云数据加载到内存中,计算量小,适合大型点云拼接,但是需要进一步研究坐标转换参数的精度以及减少重叠区域内的冗余点。

在无人机巡检方面,李欣庆等验证了无人机航空摄影测量技术的优势,并对视距外飞行的操作方法进行了探讨,研究了后期图像处理方法^[21-22]。目前,点云与影像融合是对影像数据按摄影测量方法解算内外方位元素得到影像点云,再与激光雷达点云配准进行数据融合。阳军生对单张RGB图像进行曲面重建^[23],在已知目标姿态的情况下,借助微分几何分析计算深度图像,恢复被摄物体的镜面形状,进而重建出一个

近似原型的3D模型。Drost采用一种高效的姿态检测方法^[24-25],使用点云、视线以及边的特征结合RGB图像来推断输入图形基元的边界,最终完成曲面重建。近年来,运动恢复结构(Structure From Motion, SFM)作为一种近景影像的处理手段^[26],无需内外方位元素初值,利用影像的特征信息自动获取序列影像的同名点对,自动计算影像间的相对姿态与内参信息,通过内外参数整体优化及点云加密得到密集点云^[27],比摄影测量方法更具有优势。

本文研究了多站激光雷达点云的整体配准方法以及无人机多视影像生成密集点云与站载点云配准对大跨钢结构节点的变形监测。采用基于几何特征的可迭代整体配准算法,提出了多站整体平差配准,以各个约束误差构建的权函数为约束进行解算。对于球节点的偏心监测,通过求解多条异面直线的公垂线的中点坐标,与球心坐标进行比对,可监测球是否存在偏心。最后,通过计算机视觉SFM和全局优化的光束法平差算法,实现了无人机近景摄影得到的多视影像生成点云模型与三维激光点云模型的上下配准,弥补地面激光点云疏密不均的不足,提高了特大钢结构变形监测的全面性及精确性,并对亚洲最大钢结构进行了变形监测,验证该方法的可行性。

2 点云整体配准及多连杆球体构件中心求取算法

2.1 多特征约束的整体点云配准算法

为获得特大钢结构的整体模型,实验设站较多。由于配准站点多容易造成误差累积,逐站配准的精度会越来越低,而点云数据的配准质量关系着后续整体的测量精度,所以本文提出了基于多特征的整体配准算法。该方法首先提取出点云中的可用特征,确定配准基站,初值参数由局部逐站粗配准提供。从基站开始向外搜索相邻同名特征点,通过罗德里格矩阵将各站点云配准到基站上,并将基站逐步向外拓展,计算各个站点的旋转矩阵以及同名点坐标作为整体平差的参数初值。将特征约束的初值作为观测值列出

误差方程,进行整体平差,通过光束法平差模型解算空间变换参数及未知点平差值。对各个约束的误差进行检验,当误差小于规定阈值时,输出配准结果;若误差过大,通过权函数重新计算各约束的权值。在迭代过程中不断修正观测值的权值,直至满足精度要求,停止迭代并输出配准点云。

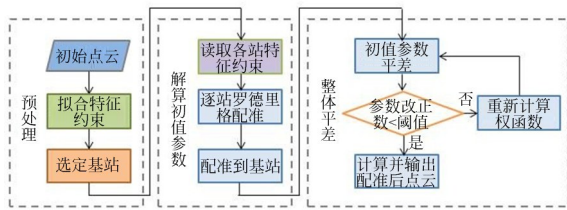


图1 点云配准算法流程

Fig. 1 Flowchart of point cloud registration algorithm

局部粗配准利用基站和配准站之间的特征约束,通过罗德里格矩阵进行逐站配准。

特征约束可以是点、线、面等,实验中采用靶球心为特征,列出点误差方程进行解算。根据坐标转换原理,空间中3对不在一条直线上的同

$$R = \frac{1}{1 + a^2 + b^2 + c^2} \begin{bmatrix} 1 + a^2 - b^2 - c^2 & -2c - 2ab & -2b + 2ac \\ 2c - 2ab & 1 - a^2 + b^2 - c^2 & -2a - 2bc \\ 2b + 2ac & 2a - 2bc & 1 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix}$$

平移参数的误差方程为:

$$V = \Delta X - (X_0 - RX). \quad (4)$$

采用整体平差的思想,以光束平差模型对3类特征约束进行解算。该方法通过布设配准标志将多个测站联合构成区域网,将各扫描站到各定向靶球视为单个光束,并以每个光束为具体平差单元,以坐标转换模型为依据,建立全区域统一的误差方程,整体求解每个测站的坐标转换参数及其改正数。扫描对象中的特征点 $X_{i0} = (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})$ 与其观测值 $X_i = (x_i, y_i, z_i)$ 之间存在如下关系:

$$X_{i0} - (\lambda RX_i + \Delta X) = 0, \quad (5)$$

其中:尺度参数 $\lambda = 1$, ΔX 为偏移量。线性化展开后得到误差方程:

$$V_1 = A_1 t + BX - L_1. \quad (6)$$

检查观测值误差,根据验后方差选择权迭代法的权函数式(7),将超出阈值的观测

名点即可求解出空间转换参数。两站中的同名特征点 $X_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 和 $X = (x, y, z)$ 的关系如下:

$$X_0 - (\lambda RX + \Delta X) = 0, \quad (1)$$

其中: λ 是尺度参数,点云变换中尺度不变即 $\lambda = 1$; ΔX 为偏移量。重心坐标分别为 X_m 和 X_n 。

令 $\bar{X}_0 = X_0 - X_m$, $\bar{X} = X - X_n$, 坐标重心化后,同名点间的坐标转换如下:

$$\bar{X}_0 - R\bar{X} = 0. \quad (2)$$

将式(2)线性化后得到旋转参数的误差方程:

$$V = At - L, \quad (3)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} 0 & -\bar{z}_0 - z & -\bar{y}_0 - y \\ -\bar{z}_0 - z & 0 & \bar{x}_0 + x \\ \bar{y}_0 + y & \bar{x}_0 + x & 0 \end{bmatrix}$$

$$t = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} \bar{x}_0 - x \\ \bar{y}_0 - y \\ \bar{z}_0 - z \end{bmatrix}$$

以间接平差的思想解算出法方程的解,即罗德里格参数,构造旋转矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} -2c - 2ab & -2b + 2ac \\ 1 - a^2 + b^2 - c^2 & -2a - 2bc \\ 2a - 2bc & 1 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix}$$

值重新定权。

$$P_{i,j}^{v+1} = \begin{cases} \hat{\sigma}_0^2, T_{i,j} < F_{a,1,ri} \\ \hat{\sigma}_i^2, T_{i,j} \geq F_{a,1,ri} \end{cases}, \quad (7)$$

其中:检验量 $T_{i,j} = \frac{\hat{\sigma}_{i,j}^2}{\hat{\sigma}_0^2}$, 检验量 $F_{a,1,ri}$ 一般取

4.13, 相当于显著水平 $\alpha = 0.1\%$, 检验功效 $\beta = 80\%$ 。当观测值最大改正数小于阈值, 即 $\|V_{\max}\| < \sigma$ 时, 停止迭代。

通过可迭代整体配准的方法,将整体钢结构点云配准的误差控制在7 mm以下,进一步优化了整体配准模型。

2.2 球结点多连杆中心点求取算法

由与钢结构受力产生形变的原因,梁与球结点的连接可能存在偏心现象。此时可将多根杆

结构看作三维异面直线,通过求异面直线的公垂线中点,求出偏心交点,对比球心坐标可判断是否存在偏心,其原理如图 2 所示。

图中,点 A_1, A_2 在各自平面的齐次坐标分别为 $(u_1, v_1, 1)$ 与 $(u_2, v_2, 1)$; 在世界坐标系下的齐次坐标则为 $(X, Y, Z, 1)$; m_{ij}^k 分别为投影矩阵 T 的第 i 行第 j 列元素; Z_{d1}, Z_{d2} 表示球心 A 在两钢柱坐标系下的坐标。由此可得直线 O_1A_1, O_2A_2 关于 $X,$

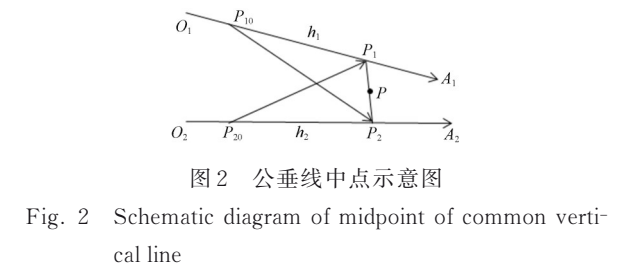


图 2 公垂线中点示意图
Fig. 2 Schematic diagram of midpoint of common vertical line

Y, Z 的一般线性方程:

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1)X + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1)Y + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1)Z = m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1)X + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1)Y + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1)Z = m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2)X + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2)Y + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2)Z = m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2)X + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2)Y + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2)Z = m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{cases}. \quad (9)$$

进而得到 O_1A_1, O_2A_2 的方向向量 v_1, v_2 如下:

$$v_1 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1 & u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1 & u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1 \\ v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1 & v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1 & v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1 \end{vmatrix}, \quad (10)$$

$$v_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2 & u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2 & u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2 \\ v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2 & v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2 & v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2 \end{vmatrix}. \quad (11)$$

公垂线的方向向量为 $h = h_1 \times h_2$, 由几何学可知, 向量 $P_{10}P_2, h_1h$ 与向量 $P_{20}P_1, h_2h$ 分别共

$$\begin{cases} (x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = (x-d)^2 + (y-e)^2 + (z-f)^2 \\ (x-g)^2 + (y-h)^2 + (z-i)^2 = (x-j)^2 + (y-k)^2 + (z-l)^2 \\ (x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = (x-j)^2 + (y-k)^2 + (z-l)^2 \end{cases}. \quad (14)$$

若中点数为奇数, 则 3 个中点看作三角形顶点, 求出三角形质心, 再求点到直线距离的中点坐标, 即为球心坐标, 也就是钢结构每个球结点的三维空间中心坐标。

2.3 LiDAR 与非量测相机影像数据融合

传统方法通过摄影测量原理实现二维影像到三维空间的转换, 当不能给出理想的内外方位元素的时候, 存在内外方位元素精确求解不收敛的问题。本文使用基于视觉 SFM 算法以及改进的 RANSAC 算法, 通过无人机近景摄影测量获

面, 如式(12)和式(13)所示:

$$\begin{vmatrix} x_2 & y_2 - y_{10} & z_2 - z_{10} \\ h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_1 & h_2 & h_3 \end{vmatrix} = 0, \quad (12)$$

$$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 - y_{20} & z_1 - z_{20} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_1 & h_2 & h_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可求得点 P_1, P_2 , 进而求得中点 P 。

多条异面直线两两分别求得中点, 若中点数为偶数 $P(a, b, c), Q(d, e, f), R(g, h, i), S(j, k, l)$, 以 4 个中点坐标为球面上的点, 由于球面上的点到球心的距离相等, 所以联立式(14)即可求得球心坐标。

得了多张钢结构顶部影像, 具有重叠的数字影像数据要进行特征检测与匹配。利用 SFM 算法实现影像到三维点云的转换, 通过影像特征检测与匹配, 利用 SFM 算法获得三维相机的位置, 再用光束法全局优化得到精确的稀疏点云, 最后通过插值算法得到密集点云, 再根据特征匹配完成影像生成点云与地面 LiDAR 点云的配准, 实现尺度的一致性, 从而达到 LiDAR 与非量测数字影像的有效融合。具体流程和结果分别如图 3 和图 4 所示。

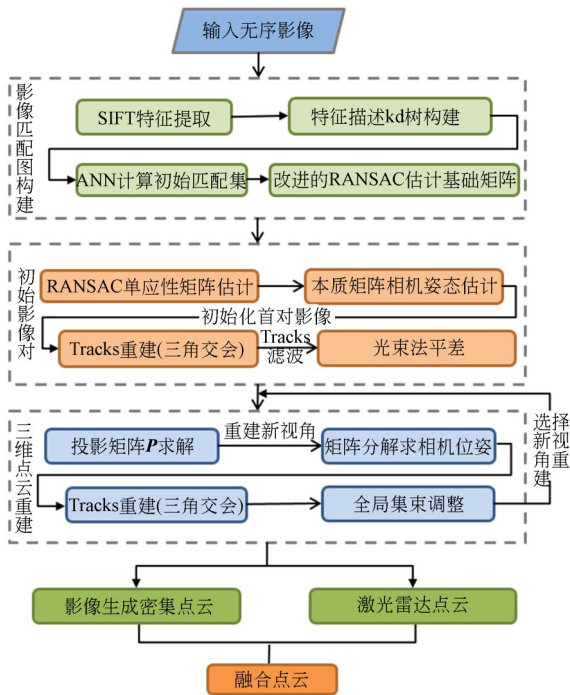


图 3 激光点云数据与影像数据融合流程

Fig. 3 Fusion flowchart of LiDAR point cloud data and image data

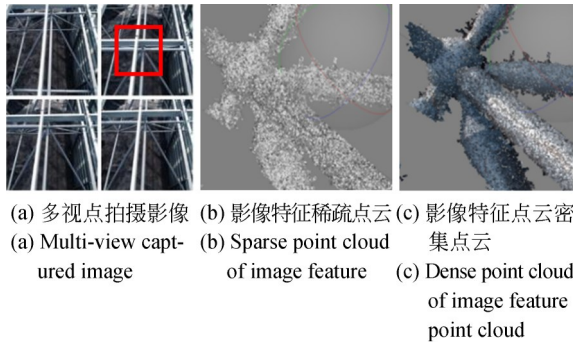


图 4 激光点云数据与影像数据融合结果

Fig. 4 Fusion result of LiDAR point cloud data and image data

在匹配图构建受到影响时,首先利用 SIFT 特征检测算子在影像上进行特征提取,并两两之间进行匹配。为了加快匹配速度,通过对特征描述子建立 kd 树,采用 ANN 优化搜索算法对每一个影像对 (I, J) 寻找特征点匹配关系,并将匹配点加入到候选匹配点集中参与后续运算。但候选匹配点中仍可能存在误匹配,因此采用基于改进 8 点法与 RANSAC 算法结合估计基础矩阵,并利用基础矩阵对匹配点进行过滤,从而得到较好的

匹配点。

在做初始影像对时,首先利用 RANSAC 算法估算两两影像之间的单应性矩阵,排除单应性关系较强的影像对作为初始相对。再通过统计影像对之间的特征匹配数量,选择匹配数量最多的作为初始影像对。然后估算初始影像对之间的本质矩阵,利用矩阵分解解算其相对位姿。再通过三角交会构建三维点,最后进行一次光束法平差优化初始影像对的相对位姿与三维点。

最后从剩余影像中加入一张新影像,并通过与第二张影像中的匹配点寻找新影像的 2D 与 3D 对应点,求解出其投影矩阵 P 。分解 P 得到新影像的位姿,同时与第二张影像进行三角交会,重建出新的三维点。最后,对初始影像对与新加入的影像进行光束法平差优化。重复上述步骤,直到所有影像全部加入重建过程为止,得到稀疏点云。再通过密集匹配算法得到密集点云,从而得到融合后的点云数据,达到影像与激光点云融合的目的。

3 实验与结果分析

以某亚洲最大面积钢结构为例,主体钢屋盖的平面投影为矩形,结构总高度为 24.6 m。屋盖采用正放四角锥空间网架结构体系,连接节点为螺栓球节点,支撑形式为下弦柱点支撑,现网架与柱采用固定支座连接,如图 5 所示。因钢结构跨度较大,扫描共设 134 站,基于本文提出的多站



图 5 大跨钢结构现场

Fig. 5 Large-span steel structure site

点云整体配准的方法,效率极高,精度误差为 5 mm,配准结果如图 6 所示。

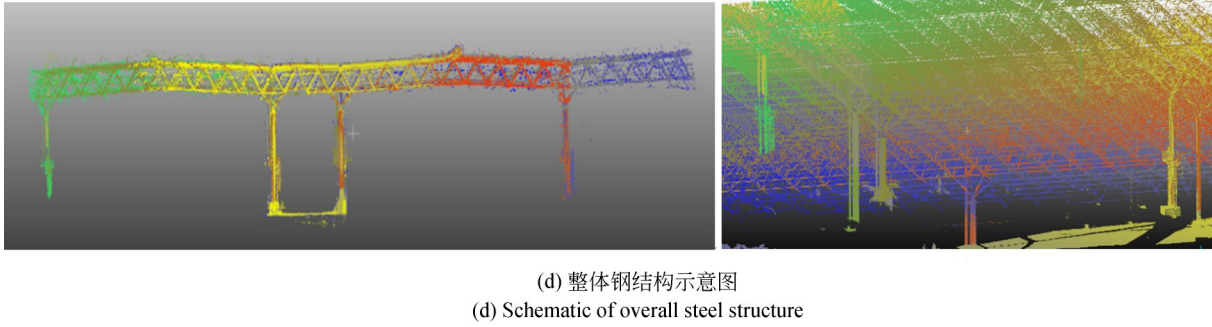
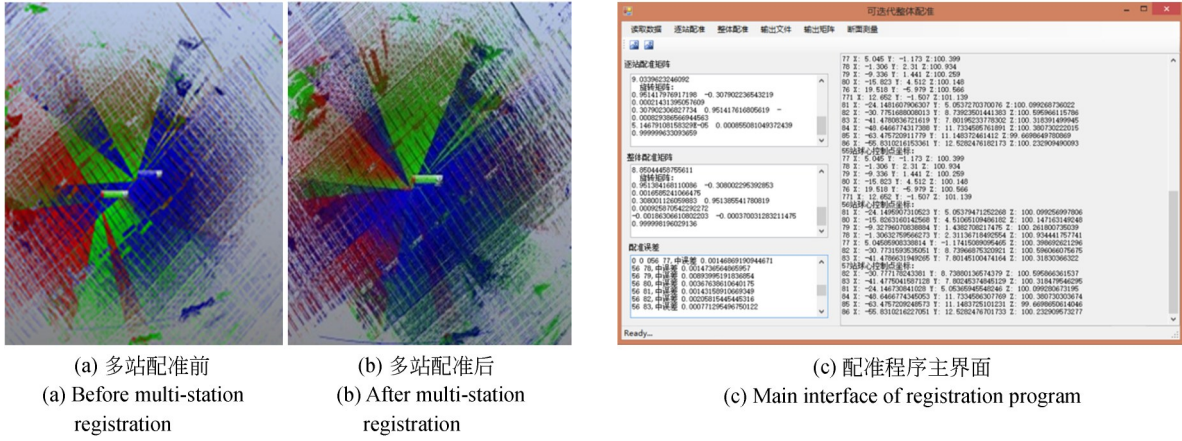


图 6 点云配准结果

Fig. 6 Results of point cloud registration

3.1 球结点多连杆偏心分析

对球点云以及柱点云进行特征拟合。部分

柱中轴线的延长线并未过球心,如图 7 所示,可知部分边柱和角柱处的网架支座存在偏心现象。

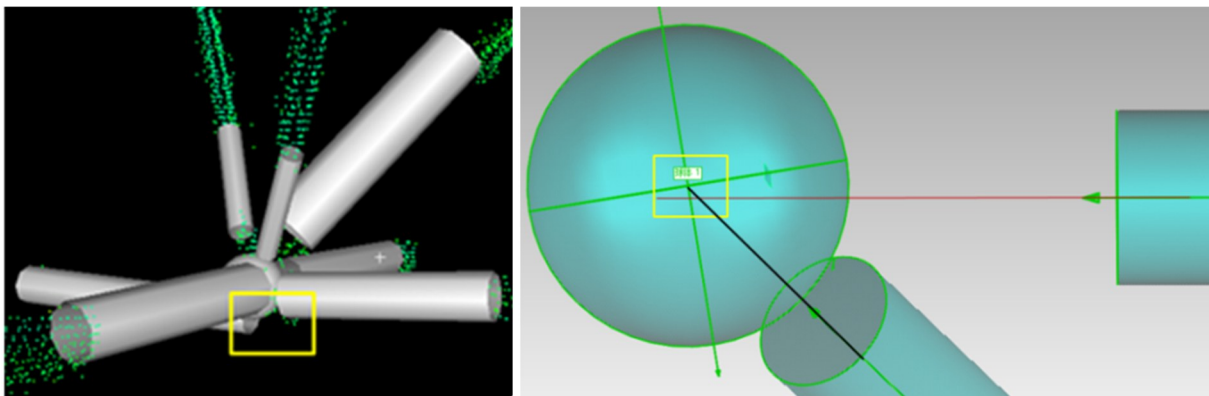


图 7 球结点多连杆偏心示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ball node multi-link eccentric

3.2 LiDAR 点云与无人机多摄影像配准融合及球柱偏心分析

通过融合计算机视觉 SFM 和全局优化的光束法平差算法,实现无人机近景摄影得到的多视影像生成密集点云,结合三维激光点云进行上下点云配准。然后对球和柱进行特征拟合,通过分析柱的中轴线是否过球心可判断是否存在偏心现象。此网架结构共检测 21 根钢柱的倾斜,其中 16 根边柱的偏差接近或大于 35 mm (32.1~68.2 mm,方向均向外),不符合标准,如图 8 所示。

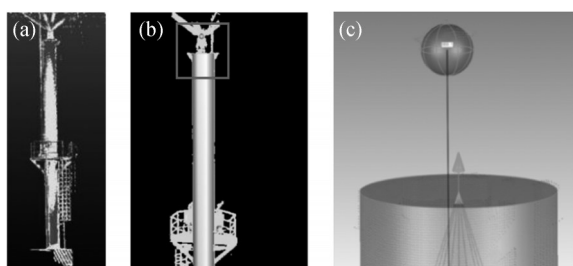


图 8 (a)使用上下点云配准后的柱子;(b~c)球柱偏心示意图

Fig. 8 (a) Column after registration using upper and lower point clouds; (b-c) Schematic diagram of eccentricity of spherical column

参考文献:

- [1] 焦嘉琦.《与文物对话》——从文物原形到文物仿真到文物保护——生死抉择[A]//北京市科学技术协会、北京工艺美术学会、北京市文物保护协会.面向 2049 年北京的文物保护及其现代化管理学术论文集[C].北京市科学技术协会、北京工艺美术学会、北京市文物保护协会.北京:北京市文物保护协会,2000.
- JIAO J Q. "Dialogue with Cultural Relics" —— From Cultural Relics Prototype to Cultural Relics Simulation to Cultural Relics Protection —— Choice between Life and Death [A]// Beijing Science and Technology Association, Beijing Arts and Crafts Society, Beijing Cultural Relics Protection Association. Academic Papers on Cultural Relics Protection and Modern Management Facing Beijing in 2049 [C]. Beijing Science and Technology Association, Beijing Arts and Crafts Society, Beijing Cultural Relics Protection Association, 2000. (in Chinese)
- [2] 王晏民,郭明,王国利,等.利用激光雷达技术制

表 1 存在偏心的柱偏差值

Tab. 1 Column deviation values with eccentricity

检测位置	偏差/mm	测点高差/mm	垂直偏差
柱 8-N	向北倾斜 32.1	13 914	1/433
	向东倾斜 17.3	13 659	1/790
柱 7-P	向西倾斜 11.9	14 052	1/1 181
	向北倾斜 37.3	14 069	1/377

4 结 论

本文根据现代工业检测精度高、速度快的要求,提出了基于几何特征约束的整体点云配准方法以及基于计算机视觉与改进的 RANSAC 算法生成无人机多视影像密集点云方法,在特大钢结构监测领域的应用进行了基础研究与实践。整体配准精度达到 5 mm,16 根柱子偏差接近或大于 35 mm,整体钢结构网架挠度均小于 1/250。与传统检测方法相比,三维激光扫描技术与无人机近景摄影测量的优势在于非接触性、效率高、精度高,完全适合特大钢结构建筑的高精度检测。

作古建筑正射影像图[J].北京建筑工程学院学报,2006,22(4):19-22.

WANG Y M, GUO M, WANG G L, *et al.* Making orthographic images of ancient architecture with LIDAR technique[J]. *Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture*, 2006, 22(4): 19-22. (in Chinese)

[3] 高梓成,王国利,郭明.激光雷达技术在建筑垃圾土方量估算的应用[J].科学技术创新,2019(1):110-111.

GAO Z CH, WANG G L, GUO M. Application of lidar technology in earthwork estimation of construction waste [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2019(1): 110-111. (in Chinese)

[4] 王张飞,刘春阳,隋新,等.基于深度投影的三维点云目标分割和碰撞检测[J].光学精密工程,2020,28(7):1600-1608.

WANG ZH F, LIU CH Y, SUI X, *et al.* Three-dimensional point cloud object segmentation and collision detection based on depth projection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(7): 1600-1608. (in Chinese)

- [5] 丁艺杰. 某大跨度钢结构施工过程模拟与监测研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
DING Y J. *Simulation Analysis and Monitoring Research of Large-span Steel Structure in Construction Process* [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018. (in Chinese)
- [6] 赵太飞, 郭嘉文, 李晗辰, 等. 无人机航迹中电力线电晕紫外探测与定位[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 309-315.
ZHAO T F, GUO J W, LI H CH, *et al.* Ultraviolet detection and location of power line corona in UAV track [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 309-315. (in Chinese)
- [7] GUO M, ZHAO Y S, PAN D, *et al.* Key technology of overall structure monitoring of super-huge and profiled steel structure based on FEA simulation and LIDAR [J]. *Information Technology Journal*, 2013, 12(18): 4576-4581.
- [8] TRAN T T, CAO V T, LAURENDEAU D. Extraction of cylinders and estimation of their parameters from point clouds[J]. *Computers & Graphics*, 2015, 46: 345-357.
- [9] 赵有山, 郭明, 段向胜. 大跨钢结构施工过程整体变形监测技术研究[J]. 工程质量, 2014, 32(1): 3-7.
ZHAO Y SH, GUO M, DUAN X SH. The monitoring technology research on overall deformation of the construction process of large span steel structure [J]. *Construction Quality*, 2014, 32(1): 3-7. (in Chinese)
- [10] 王国利, 王晏民, 郭明. 基于平面特征的箱型钢结构点云角点自动提取[J]. 工程勘察, 2016, 44(10): 43-46.
WANG G L, WANG Y M, GUO M. Automatic extraction of corner points from box-steel-structure point clouds based on plane features[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2016, 44(10): 43-46. (in Chinese)
- [11] 李平. 地面三维激光点云数据处理及模型构建[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
LI P. *Data Processing and Model Building of Ground 3D Laser Point Cloud* [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] 王晏民, 王国利. 地面激光雷达用于大型钢结构建筑施工监测与质量检测[J]. 测绘通报, 2013(7): 39-42.
WANG Y M, WANG G L. Quality monitoring of large-scale steel buildings using terrestrial LiDAR technology [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013(7): 39-42. (in Chinese)
- [13] 李少博. 非接触式球坐标精密球度测量误差分析与补偿技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2018.
LI SH B. *Research on Error Analysis and Compensation Technology of Non-contact Spherical Coordinate* [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2018. (in Chinese)
- [14] SON H, KIM C, KIM C. Fully automated as-built 3D pipeline extraction method from laser-scanned data based on curvature computation [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015, 29(4): 1943-5487.
- [15] 王永波, 汪云甲, 韩新哲, 等. 点线特征约束下基于单位四元数描述的LiDAR点云配准算法[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 671-677.
WANG Y B, WANG Y J, HAN X ZH, *et al.* A unit quaternion based, point-linear feature constrained registration approach for terrestrial LiDAR point clouds [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(3): 671-677. (in Chinese)
- [16] MENG J G, LI J L, GAO X R. An accelerated ICP registration algorithm for 3D point cloud data [J]. *SPIE*, 10839, 2019, 1083: 1083904.
- [17] 汪奇生, 杨根新. 附不等式约束的总体最小二乘迭代算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(12): 1100-1104.
WANG Q SH, YANG G X. Iteration algorithm of total least squares with inequality constraints [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(12): 1100-1104. (in Chinese)
- [18] 刘继庚. 地面三维激光扫描点云数据自动配准算法及建模研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
LIU J G. *Research on Automatic Registration Algorithm and Modeling of Terrestrial 3D Laser Scanning* [D]. Guiyang: Guizhou University, 2018. (in Chinese)
- [19] 盛业华, 张卡, 张凯, 等. 地面三维激光扫描点云的多站数据无缝拼接[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(2): 233-237.
SHENG Y H, ZHANG K, ZHANG K, *et al.* Seamless multi station merging of terrestrial laser scanned 3D point clouds [J]. *Journal of China Uni-*

- versity of Mining & Technology*, 2010, 39(2): 233-237. (in Chinese)
- [20] 张卡, 盛业华, 付素霞, 等. 基于物方定位一致性约束的光学航空影像多视铅垂线轨迹匹配[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1784-1793.
ZHANG K, SHENG Y H, FU S X, *et al.* Multi-view VLL matching algorithm for optical aerial images based on constraint of object space positioning consistency [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1784-1793. (in Chinese)
- [21] 李欣庆, 袁秀忠, 魏星. 无人机倾斜摄影测量在河道凌情监测中的应用[J]. *人民黄河*, 2020, 42(S1): 159-161.
LI X Q, YUAN X ZH, WEI X. Application of UAV tilt photogrammetry in river flood monitoring [J]. *Yellow River*, 2020, 42(S1): 159-161. (in Chinese)
- [22] 冯凯. 输电线路采用多旋翼无人机精细化巡检方法探讨[J]. *海峡科技与产业*, 2018(7): 13-15.
FENG K. Discussion on the refined inspection method of multi-rotor UAV for transmission lines [J]. *Technology and Industry Across the Straits*, 2018(7): 13-15. (in Chinese)
- [23] 阳军生, 张宇, 祝志恒, 等. 基于图像三维重建的隧道超欠挖检测方法研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2020, 51(3): 714-723.
YANG J SH, ZHANG Y, ZHU ZH H, *et al.* Study on tunnel under-over break detection method based on three-dimensional image reconstruction technology [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2020, 51(3): 714-723. (in Chinese)
- [24] PENG J Q, XU W F, YAN L, *et al.* A pose measurement method of a space noncooperative target based on maximum outer contour recognition [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(1): 512-526.
- [25] CHAE H W, YU H, SONG J B. Onboard real-time object surface recognition for a small indoor mobile platform based on surface component ratio histogram [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17(3): 765-772.
- [26] MALI V K, KUIRY S N. Assessing the accuracy of high-resolution topographic data generated using freely available packages based on SfM-MVS approach [J]. *Measurement*, 2018, 124: 338-350.
- [27] FEURER D, VINATIER F. Joining multi-epoch archival aerial images in a single SfM block allows 3-D change detection with almost exclusively image information [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 146: 495-506.

作者简介:



郭明(1981—),男,湖北黄陂人,博士,教授,2004年于江汉大学获得学士学位,2008年于北京建筑工程学院获得硕士学位,2011年于武汉大学获得博士学位,主要从事激光雷达技术应用及三维地理信息系统的研究。E-mail: guoming@bucea.edu.cn

通讯作者:



赵有山(1982—),男,河南南阳人,博士研究生,副研究员,2008年于北京建筑大学获得硕士学位,主要从事建筑工程结构安全鉴定和工程防灾减灾的研究。E-mail: yshzhao@163.com