

# 多尺度点云数据的空间一致融合法 在钢桁梁虚拟拼装中的应用

梁 栋<sup>1</sup>, 贾铎丰<sup>1</sup>, 高 祺<sup>1</sup>, 苏立超<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 邢台路桥建设集团有限公司, 河北 邢台 054001)

**摘要** 目的 提出一种利用轮廓信息对应关系计算空间变换的多尺度点云数据融合方法, 准确获得兼顾大型钢桁梁主体以及局部螺栓孔的杆件点云信息, 从而用于钢桁梁的虚拟拼装。**方法** 首先, 结合立式三维激光扫描和手持式三维激光扫描两种方式, 分别获取表征大尺寸构件整体信息和螺栓孔群局部信息的点云数据; 然后, 基于点云数据分别提取融合部位的轮廓信息, 并使用轮廓信息对应关系计算空间变换矩阵; 最后, 利用空间变换矩阵进行点云融合。**结果** 通过主轴方向偏差和最近距离约束对融合后的模型进行融合效果评定, 验证了融合方法的准确性; 其中, 主轴角度偏差量为 $0.000\ 038\ 4^{\circ}$ 、扭转角度偏差量为 $0.011\ 75^{\circ}$ 、豪斯多夫距离为 $0.311\ \text{mm}$ , 满足工程要求。**结论** 所提方法能够针对性的对具有一定规则性的杆件进行局部特征提取, 简化了空间变换所需要的信息, 为钢桁梁虚拟拼装提供了数据基础。

**关键词** 三维激光扫描; 钢桁梁杆件; 点云; 空间变换; 数据融合

中图分类号 TU393.3; U445.47+2

文献标志码 A

**引用格式:** 梁栋, 贾铎丰, 高祺, 等. 多尺度点云数据的空间一致融合法在钢桁梁虚拟拼装中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(6): 973-983. (LIANG Dong, JIA Zhufeng, GAO Qi, et al. Application of spatially consistent fusion method for virtual assembly of steel joist girders with multiscale point cloud data [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(6): 973-983.)

## Application of Spatially Consistent Fusion Method for Virtual Assembly of Steel Joist Girders with Multiscale Point Cloud Data

LIANG Dong<sup>1</sup>, JIA Zhufeng<sup>1</sup>, GAO Qi<sup>1</sup>, SU Lichao<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401; 2. Xingtai Road and Bridge Construction Group Co. Ltd., Xingtai, China, 054001)

**Abstract:** A multi-scale point cloud data fusion method was proposed in this paper using contour information correspondence to calculate spatial transformation in order to accurately obtain the

收稿日期: 2023-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978236, 52478310)

作者简介: 梁栋(1976—), 男, 教授, 主要从事桥梁结构的智能检测等方面研究。

point cloud information of the main body of large steel truss girder and local bolt holes, so as to be used for virtual assembly of steel joist. Firstly, the point cloud data characterizing the overall information of large-size members and the local information of bolt holes were obtained by combining vertical 3D laser scanning and handheld 3D laser scanning; then, the contour information of the fused parts was extracted based on the point cloud data and the spatial transformation matrix was calculated by using the correspondence of the contour information; finally, the spatial transformation matrix was used for the fusion of the point cloud and the fusion was performed by using the deviation of the main axis and the distance constraints of the closest bolt holes. Finally, the point cloud was fused using the spatial transformation matrix and the fusion effect of the fused model was evaluated by the principal axis direction deviation and the nearest distance constraint, which verifies the accuracy of the fusion method. The deviation of the spindle angle was  $0.000\ 038\ 4^\circ$ , the deviation of the torsion angle was  $0.011\ 75^\circ$ , and the Hausdorff distance was  $0.311\ \text{mm}$ , which meet the engineering requirements. The method can target the local feature extraction of bars with certain regularity, simplify the information needed for spatial transformation, and provide the data basis for the virtual assembly of steel joist girders.

**Key words:** 3D laser scanning; steel joist bars; point cloud; spatial transformation; data fusion

近年来,人们已经能够以低成本快速准确地获取物体表现的三维信息,并通过点云信息建立三维模型。该技术也在建筑工程领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。M. Jolsen 等<sup>[2]</sup>利用地面三维激光扫描技术分析混凝土柱子和框架结构变形,验证了地面三维激光扫描技术对于结构尺寸信息获取的精度。梁栋等<sup>[3]</sup>利用三维激光扫描仪对某人行天桥进行三维模型重建,对比研究了运营期间桥梁的关键构形与设计理论成桥状态构形之间的偏差。Ma Yinhuai 等<sup>[4]</sup>提出一种使用地面三维激光扫描(TLS)和无人机搭载扫描(UAV)来综合获得点云的方法来评估复杂桥梁的尺寸。Sun Guowei 等<sup>[5]</sup>为解决钢结构制作安装过程中经常出现的由于构件体量大而浪费时间、人力的问题,探索了三维激光扫描仪在钢构件的虚拟拼装技术方面的应用。Guo Qi 等<sup>[6]</sup>使用三维激光扫描和测量机器人结合的方式获取钢构件点云数据,对两节钢柱的点云进行了模拟拼装。Xiang Liang 等<sup>[7]</sup>依托沪通长江大桥对复杂的钢桁梁进行了测试试验,使用 F. Case 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于螺栓孔位的拼装方法,完成了一对螺栓连接的钢构件拼接计算。Jiang Haili

等<sup>[9]</sup>利用三维激光扫描仪获取大型钢构件点云,并提出一种基于线特征匹配的钢结构模拟预拼装方法。Zhou Xuhong 等<sup>[10]</sup>使用三维激光扫描仪获取拱肋点云完成了对拱肋牛腿-拱间横梁节段和拱肋节段-拱肋节段进行智能虚拟预拼装。然而现有的虚拟拼装研究都是基于小尺寸构件,几乎没有将整体信息与局部构造联合使用进行虚拟拼装。在多源平台点云的数据融合研究中,H. Ayman 等<sup>[11]</sup>提出的如基于线对的2D-3D半自动配准方法,目前已经成功应用于无人机 lidar 点云与影像的配准。基于交互信息的配准算法<sup>[12]</sup>通过最大化激光点云的强度信息与可见光影像的交互信息从而求取最优配准参数。W. Y. Zhao 等<sup>[13]</sup>提出了基于影像多视立体匹配生成密集点云与激光点云的配准算法,使用迭代最近邻点算法优化初始配准,获得了精确配准参数。S. Hofmann 等<sup>[14]</sup>使用天际线实现框幅式影像与车载激光点云的配准。在自动配准方面,Li Na 等<sup>[15]</sup>提出了一种使用沙丘脊线进行沙漠地区有人机载激光数据和无人机影像数据配准的方法。

综上所述,三维激光扫描已经广泛应用于钢结构的虚拟拼装中,但还未提出兼顾钢

结构整体尺寸与局部信息兼顾的拼装方法。主要受限于无法直接得到粗细兼顾的点云模型。基于此,笔者以中铁山桥某下弦杆为目标,利用两种扫描仪分别获取整体和局部点云信息,提出一种利用轮廓信息对应关系计算空间变换的多尺度点云数据融合方法;并通过计算融合后模型轴线偏角和最近距离,验证该方法的准确性,为钢桁梁构件的虚拟拼装提供精确点云模型基础。

1 多尺度点云信息获取及预处理

1.1 点云数据的获取

立面三维激光扫描获取的是场景点云信

息,扫描工作受周围环境的影响较大,因此需要合理设计扫描路径、标靶球位置和测站位置。手持式三维激光扫描则需要预先在被测区域张贴反光定位贴,完成扫描仪的校准之后方可进行扫描。全部扫描流程如图 1 所示。

立式三维激光扫描主要为了获得弦杆外轮廓信息,特别是主轴线方向的尺寸信息。针对细长杆件,笔者提出了一种保留端部多特征的扫描方案。测站围绕构件四周布设六站,布设位置选择正对棱角线的四处以及正对杆件侧面中心的两站,在相邻两站的公共视场安放三个非线性布置的标靶球,如图 2 所示。

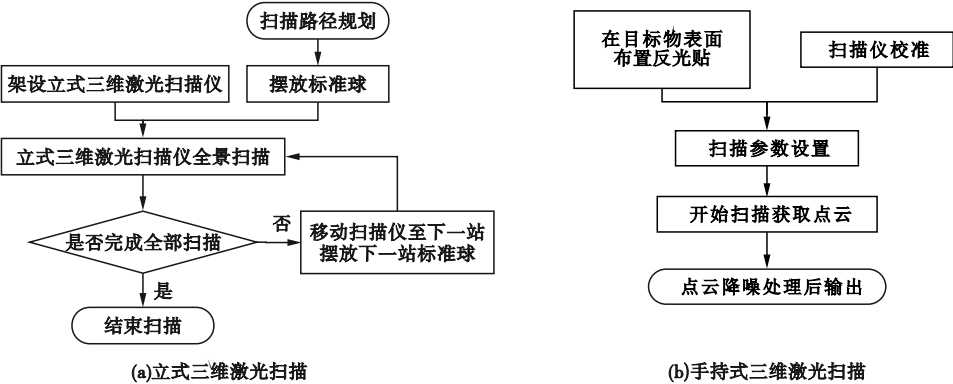


图 1 扫描流程图

Fig. 1 The scanning flow chart

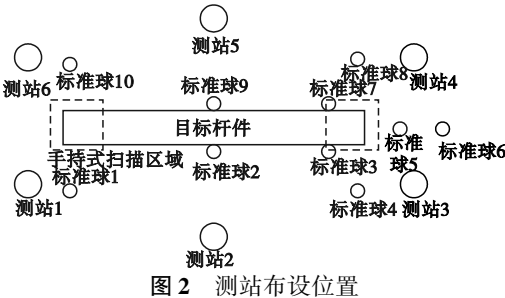


Fig. 2 Layout location of the stations

1.2 融合关键信息提取

1.2.1 基于改进直通滤波分割的降维边界提取

为了建立点云数据的拓扑结构,笔者用 KD-Tree 法建立散乱点云的 KD-Tree 结构,从而查询点  $P_i$  的  $k$  邻域点集  $P_{ij}(j=0,1,\cdots,$

$k-1)$ 。平面点云中以点  $P_i$  和其  $k$  邻域点集  $P_{ij}(j=1,2,\cdots,k-1)$  构成点集合  $X(p,q)$ 。以  $X(p,q)$  中的  $P_i$  点作为向量的起点,  $P_{ij}$  作为向量终点,得到平面向量集  $P_iP_{ij}(j=0,1,\cdots,k-1)$ 。建立局部平面坐标系,以  $P_i$  作为坐标原点,  $P_iP_{i0}$  作为坐标系的  $x$  轴,平面法向量  $n$  与向量  $P_iP_{i0}$  的叉乘  $n \times P_iP_{i0}$  作为坐标系的  $y$  轴。计算向量集  $P_iP_{ij}$  中每个向量与局部坐标系的  $x$  轴的夹角  $\alpha_j$  (见图 3(a)) 以及其与  $y$  轴的夹角  $\beta_j$  (见图 3(b))。若  $\beta_j > \pi/2$ , 则  $\alpha_j = \alpha_j + \pi$ 。计算完向量集中的每个夹角后,将  $\alpha_j$  按照升序进行排列得到夹角序列  $\eta_j$ , 计算  $\eta_j$  相邻角度之间的夹角  $\theta_j = \eta_j - \eta_{j-1}, j=0,1,\cdots,k-1$ 。

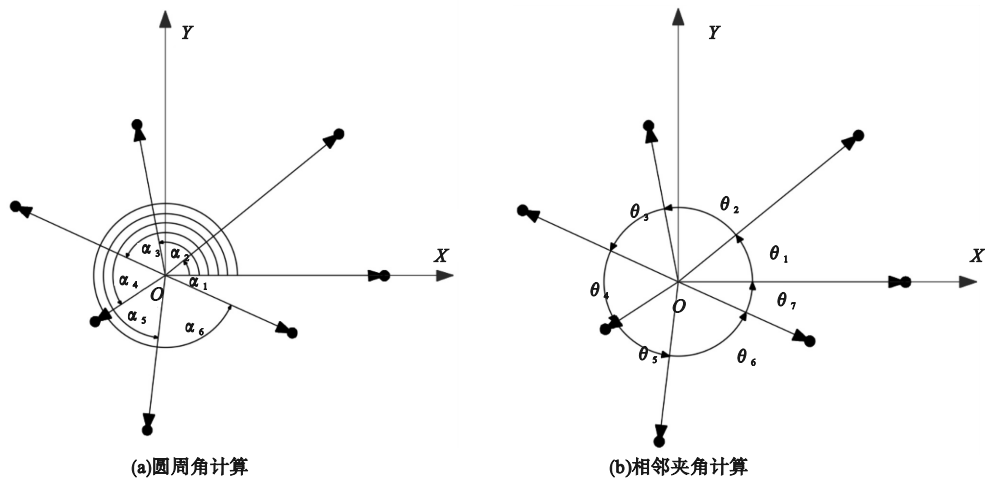


图3 计算相邻向量夹角

Fig. 3 Angle calculation between the adjacent vectors

比较相邻角度序列  $\theta_j$  中最大夹角  $\theta_{max}$  是否超过最大夹角阈值  $\varepsilon_\theta$ , 若  $\theta_{max} > \varepsilon_\theta$ , 则点  $P_i$  为边界点, 否则为非边界点。不同点位的识别如图4所示。

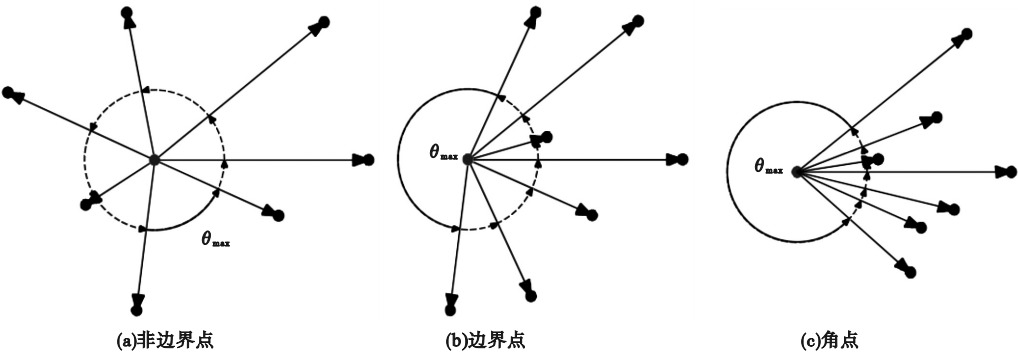


图4 边界点识别

Fig. 4 The boundary point identification

由图4可以看出,  $\pi$ 、 $\pi/2$  分别为非边界点与边界点、边界点与角点的区分界限, 通过增加阈值可以进一步划分边界点与角点, 因此找到更大的有效阈值便可以更精准地划分出角点、端点。将平面点云投影至平行于该平面法向量的某一平面上可以得到分布的点云。因此可以根据点云的采样间距  $d$ , 激光采集误差  $t$ , 并按照下式计算设定阈值:

$$\varepsilon_\theta = 2\pi - 2 \arcsin\left(\frac{2t}{d}\right). \tag{1}$$

虽然通过上述特方法不能直接用于三维点云的角点提取, 但存在于不同二维空间中的点可以沿着某个维度排列构成线性点云。

据此可以将点云按照指定维度方向切片投影为多个平面点云, 通过以上提取方法获得角点, 最终还原三维坐标便可以得到目标物轮廓点云。设定阈值的计算如图5所示。

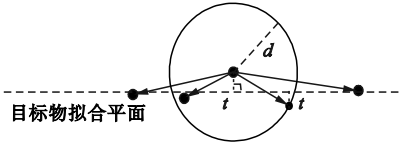


图5 设定阈值计算示意图

Fig. 5 The schematic calculation diagram of the set threshold

笔者提出改进直通滤波算法, 首先计算点云在滤波维度上的最大范围  $H = d_{max} -$

$d_{\min}$ ,并将最大范围  $n$  等分。随后创建第一个独立集  $Q_1$  将直通滤波内点加入独立集,保留外点执行下一步循环。之后的每次循环,滤波限制最大值各增加  $H/n$ ,直至滤波限制达到最大值  $d_{\max}$  时停止循环,划分示意图如图6所示。

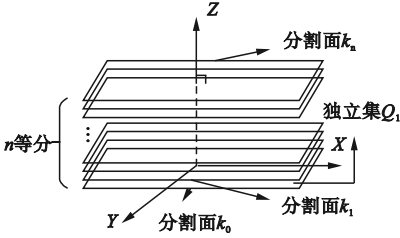


图6 基于改进直通滤波的空间划分

Fig. 6 The spatial partitioning diagram based on improved direct-pass filtering

### 1.2.2 参数信息提取

通过上述计算得到轮廓点云后,使用RANSAC多线拟合方法计算每条边界的直线方程,设置目标函数为直线的点向式方程如:

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p}. \quad (2)$$

其中,方向向量  $s' = (m, n, p)$ ,点的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ 。

通过上述拟合方法可以计算出点云的轮廓方程,但是这些方程并不相交,无法直接得到准确的交点信息作为点云的特征角点。对此笔者提出了一种计算近似交点作为特征角点的方法。第  $i$  个轮廓方程转换成参数方程的形式:

$$\begin{cases} x_i = x_{0i} + am_i; \\ y_i = y_{0i} + an_i; \\ z_i = z_{0i} + ap_i. \end{cases} \quad (3)$$

分别在第  $i$  个和第  $k$  个方程上取点  $I(x_i, y_i, z_i)$  和  $K(x_k, y_k, z_k)$  参数为  $b$ ,计算两点间的距离:

$$d_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}. \quad (4)$$

显然,  $d_{ik}$  是关于参数  $a$  和  $b$  的方程,求解方程的最小值  $d_{\min}$ ,即为两条轮廓线之间的距离,计算此时的点  $I$  和点  $K$  的中点作为两直线的交点。

从目标物的几何特征可知,所提取轮廓结构中包含大量具有平行关系的边界,因此如何选择合适的边界用于计算空间变换矩阵是一大难题。笔者使用了一种寻找主方向与几何中心的方法,并使用这些特征计算空间变换矩阵。几何中心可以使用角点坐标的重心坐标代替:

$$\begin{cases} \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \\ \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; \\ \bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}. \end{cases} \quad (5)$$

主方向计算方法如下:首先根据边界中的平行关系,将所提取的方程按照近似平行方向分类出数量最多的三类向量集  $L_{ai}$ ,  $L_{bi}$  和  $L_{ci}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ),按照式(6)计算向量集的平均向量作为主方向。

$$L_A = \frac{\sum_{i=1}^k L_{ai}}{k}. \quad (6)$$

## 2 基于向量特征的融合及评定方法

### 2.1 空间变换原理

在点云配准理论中,不同尺度的点云数据  $P$  和  $Q$  存在  $P_i(X, Y, Z) \in P, Q_i(x, y, z) \in Q$ 。其中,  $P_i$  与  $Q_i$  为空间中不同坐标系下的同名点,其符合刚体变换  $(R, T)$  且所有同名点均满足该变换关系,即:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = RS \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T. \quad (7)$$



其中,  $R$  为旋转矩阵;  $S$  为放缩系数;  $T$  为平移矩阵。

除了对于三维空间点云外, 空间中任意两个非零向量  $a$  与  $a'$  也可以使用同样的空间变换实现配准。由于向量没有空间位置关系, 不需要考虑平移矩阵  $T$ , 其空间变换可以表示成:

$$a' = R \times S \times a. \tag{8}$$

2. 1. 1 旋转矩阵计算

对于两个任意三维空间向量  $a$  与  $a', k$  为旋转轴的单位向量,  $\alpha$  为旋转角, 那么向量  $a$  在右手螺旋定则意义下绕旋转轴  $k$  旋转角度  $\alpha$  可以得到与指定向量  $a'$  平行的向量  $a_{rot}$ 。  $a_{rot}$  可以由三个不共面的向量  $a, k$  和  $a \times k$  表示:

$$a_{rot} = (1 - \cos\alpha)(a \times k) + \cos\alpha a + \sin\alpha \times k \times a. \tag{9}$$

其空间变换如图 7 所示。

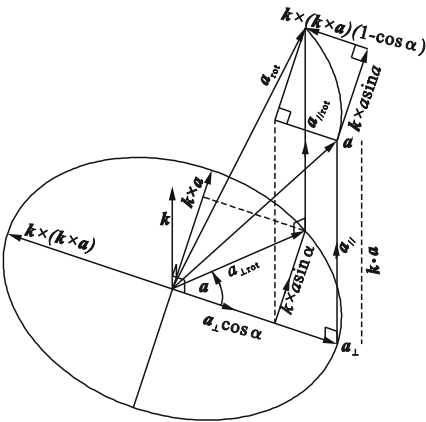


图 7 向量空间旋转

Fig. 7 The spatial rotation of a vector

首先将被旋转向量  $a$  正交分解为与旋转轴  $k$  ( $k$  为单位向量) 平行的分量  $a_{||}$  和与旋转轴垂直的分量  $a_{\perp}$ , 在旋转变换过程中平行分量  $a_{||}$  是保持不变的, 而垂直分量  $a_{\perp}$  则刚好旋转  $\alpha$  角度。将平移分量和旋转后的垂直分量相加, 即可得到旋转后的向量  $a_{rot}$ 。对向量  $a$  沿旋转轴平行和垂直方向做正交分解:

$$a = a_{\perp} + a_{||}. \tag{10}$$

$$a_{||} = (a \times k)k. \tag{11}$$

$$a_{\perp} = a - a_{||} = a - (a \times k)k. \tag{12}$$

此时还需要计算  $a_{\perp}$  和  $k$  的外积  $w$ , 且向量  $w$  的模与  $a_{\perp}$  相等。

$$w = k \times a_{\perp} = k \times a. \tag{13}$$

可得到向量  $a_{\perp}$  旋转后的向量  $a_{\perp rot}$ :

$$a_{\perp rot} = \cos\alpha a_{\perp} + \sin\alpha w = \cos\alpha(a - (a \times k)k) + \sin\alpha(k \times a). \tag{14}$$

将  $a_{||}$  与  $a_{\perp rot}$  相加即可得到旋转后的向量  $a_{rot}$ :

$$a_{rot} = a_{||} + a_{\perp rot}. \tag{15}$$

将式(14)中的  $a$  和  $k$  均表示为列向量形式, 即  $a = (a_x, a_y, a_z)^T$  和  $k = (k_x, k_y, k_z)^T$ , 那么旋转后的向量为

$$a_{rot} = R \times a. \tag{16}$$

$$R = E \cos\alpha + (1 - \cos\alpha) \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_x & k_y & k_z \end{pmatrix} + \sin\alpha \begin{bmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{bmatrix}. \tag{17}$$

刚体在三维空间中至少需要两次旋转, 才可以达到空间完全平行状态。在实际操作过程中往往一次旋转无法实现两组数据的完全平行, 此时在不影响第一次旋转结果的情况下, 需要以第一次旋转的向量  $a_{rot}$  为轴进行第二次旋转, 如图 8 所示。旋转角通过将待旋转向量  $b$  和  $b'$  向垂直和平行于旋转轴方向分解, 以  $b_{\perp}$  和  $b'_{\perp}$  的空间角为旋转角。

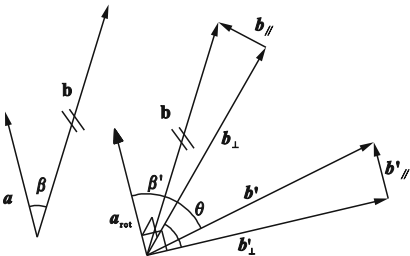


图 8 二次旋转示意图

Fig. 8 The schematic diagram of secondary rotation

此时求解得到的两次旋转的旋转矩阵分

别为  $R_1$  和  $R_2$ , 将两个旋转矩阵叠加为  $R$ :

$$R = R_2 R_1. \quad (18)$$

### 2.1.2 平移放缩计算

将点  $p(x, y, z)$  平移到  $p'(x', y', z')$ , 在  $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴三个方向平移的距离分别为  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$ 。给坐标的对应分量上直接加上这些  $T$  值, 便可以确定点  $p$  坐标。

$$\begin{cases} x' = x + T_x; \\ y' = y + T_y; \\ z' = z + T_z. \end{cases} \quad (19)$$

依据式(9)结构无法通过使用  $3 \times 3$  的矩阵表示平移, 为了解决这个问题, 可以通过升维至一个  $4 \times 4$  的矩阵, 以及具有第四个分量 (通常默认为 1.0) 的矢量。对此, 假设点为  $p$  的坐标为  $(x, y, z, 1)$ , 平移后的点  $p'$  的坐标为  $(x', y', z', 1)$ , 因此平移变化可以表示为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

在求解完旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$  后, 需要通过已知对应点求解放缩倍数  $S$ , 在整个变换中存在两对对应点  $P_1$ 、 $Q_1$  和  $P_2$ 、 $Q_2$ , 均满足式(22)对应关系。使两式做差可得:

$$\begin{bmatrix} X_1 - X_2 \\ Y_1 - Y_2 \\ Z_1 - Z_2 \end{bmatrix} = SR \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \\ z_1 - z_2 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

因此可以求得放缩系数  $S$  为

$$S =$$

$$\frac{\sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}}. \quad (22)$$

综上所述, 可将以上所有变换融合为一个空间变换联合矩阵, 该矩阵由旋转矩阵  $R$ 、平移矩阵  $T$  以及缩放倍数  $S$  共同组成:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SR_2 R_1 & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

### 2.2 变换矩阵修正

使用旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$  作用于原始点云和轮廓信息模型的融合工作中, 并可视化融合效果。该数据融合仍是一个粗配准的过程, 需要使用迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 精配准算法对融合效果进行优化, 得到综合变换矩阵。经典 ICP 算法使用欧式距离最小点作为对应点并建立对应点集, 然后求解刚体变换矩阵, 将该矩阵作用于目标点云, 使目标点云改变位置, 接着判断变换后点对的欧式距离是否达到阈值, 如未达到则继续迭代以上过程, 如达到阈值则结束迭代。

### 2.3 基于主轴方向偏差的融合效果评定方法

#### 2.3.1 轴方向偏差

根据杆件长度方向筛选出 1.2 节计算得出的主轴方向向量  $L_A$ 。为了验证  $L_A$  能够作为向量集  $L_{ai}$  的代表, 分别计算每个向量与平均向量的夹角  $\theta_i$ 。

首先按照升序重新排列  $\theta_i$ , 判断  $\theta_i$  中是否存在大于方向最大偏差, 若存在, 则将其剔除夹角序列  $\theta_i$ 。在剔除了明显超出误差阈值的边界后重新计算平均向量, 序列中的夹角数量小于 5 时, 判断夹角是否满足阈值; 反之计算夹角序列  $\theta_i$  中剩余样本的均值  $\mu$  与方差  $\sigma$ , 构造高斯分布函数:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (24)$$

通过判断置信区间 95% 以外是否存在样本数值来确定该序列是否均匀聚拢, 若存在超出置信区间的样本可剔除该样本重新计算序列中剩余数据的高斯分布, 直至满足置信条件。

其次为主轴方向夹角计算。将满足条件





3.2 钢桁梁多尺度点云获取

根据扫描需求以及现场实际情况,本次扫描所选择的扫描仪分辨率为 6.3 mm@10 m。由于被测杆件是按照指定位置特意摆放,没有存在其他构筑物的遮挡,因此设 6 站即可完成扫描,设站位置如图 10 所示。在进行每测站的扫描作业前,在相邻站点间至少需设立三个非线性关系的标靶球便于后续各站间的点云数据自动配准。由于标靶球的总数量有限,需要跟随扫描进度调节标靶球位置,最先布置的标靶球依次向后移动,直至完成全部扫描作业。

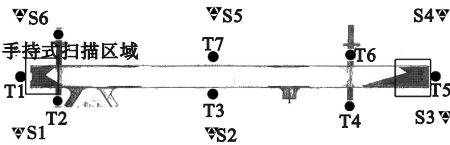


图 10 标靶球位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the target position

便携式三维激光扫描使用 INNO-SCAN II 手持式扫描仪进行作业,首先在目标杆件端部贴上反光标签,同时对扫描仪进行扫描校准,需要完成 14 个方位的全部校准才可以进行正式扫描。采用平铺式扫描方法,可边观察软件实时呈现的扫描数据进行调整,保

证获取的点云数据完整,待点云获取完成后,停止采集保存输出点云。

3.3 特征信息获取

将每个独立空间中的点云沿着划分维度方向进行降维,简化为二维坐标。经过降维操作,每个独立空间中的点云可以看作一个平面点云集。通过基于数据点及周围分布均匀性的边界提取方法准确提取出具有角点特征的点云。将提取得到的角点还原至三维坐标,轮廓提取结果如图 11 所示。

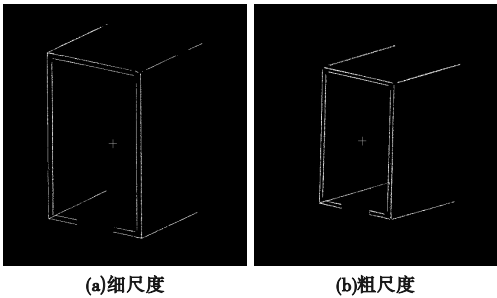


图 11 点云轮廓提取结果

Fig. 11 Contour extraction results of the point cloud

参数信息提取使用笔者提出的主方向和几何中心计算方法,求解得到立面扫描的三个主方向表示向量和几何中心坐标,将两组计算的主方向和中心汇总到表 1 中。

表 1 主方向和几何中心

Table 1 The principal direction and geometric center

扫描方式	向量	主方向坐标( $x,y,z$ )	几何中心坐标( $\bar{X},\bar{Y},\bar{Z}$ )/mm
立面扫描	$L_A$	(0.881 489, -0.145 937, 0.449 076)	(-447.515, 179.637, 414.496)
	$L_B$	(-0.195 037, -0.977 957, 0.071 790)	
	$L_C$	(-0.431 655, 0.150 746 2, 0.889 353)	
便携扫描	$I_A$	(0.999 985, -0.004 855, 0.001 917 6)	(-571.562, -502.946, 443.120)
	$I_B$	(-0.001 35, -0.999 981, 0.004 942 8)	
	$I_C$	(-0.003 62, 0.001 750 3, 0.999 988 5)	

3.4 点云数据融合

3.4.1 变换矩阵计算

按照第 2.1 节提出的变换矩阵计算方法对实验杆端部进行变换矩阵的计算,由于采用的两种扫描方式存在着尺度上相差 1 000 倍的关系,可以直接使用  $S = 1\ 000$  对立面扫

描点云进行放大。

通过以上计算得到的主方向  $L_A$  与  $I_A$  的对应计算一次旋转矩阵  $R_1$ ,将向量  $L_A$ 、 $I_A$  所计算的空间角  $\alpha$  和  $k$  带入式(16)中,其中旋转轴  $k$  为  $L_A$  和  $I_A$  的叉乘,  $R_1$  的计算结果为

$$\boldsymbol{R}_1 = \begin{bmatrix} 0.883\ 053 & 0.142\ 108 & -0.447\ 24 \\ -0.141\ 20 & 0.989\ 342 & 0.035\ 556 \\ 0.447\ 525 & 0.031\ 755 & 0.893\ 708 \end{bmatrix}.$$

(29)

以 $\boldsymbol{L}_A$ 为轴, $\boldsymbol{L}_B$ 与 $\boldsymbol{I}_B$ 对应计算第二次旋转 $\boldsymbol{R}_2$ ,分别将通过 $\boldsymbol{L}_B$ 、 $\boldsymbol{I}_B$ 计算得到的旋转角 $\theta$ 和旋转轴 $\boldsymbol{L}_A$ 带入式中, $\boldsymbol{R}_2$ 计算结果为

$$\boldsymbol{R}_2 = \begin{bmatrix} 0.998\ 59 & 0.049\ 559 & 0.018\ 867 \\ -0.051\ 18 & 0.993\ 824 & 0.098\ 458 \\ -0.013\ 87 & -0.099\ 29 & 0.994\ 962 \end{bmatrix}.$$

(30)

上述旋转过程均是在以坐标原点为中心的基础上进行的,便携式扫描的几何中心也随着两次旋转改变了位置,先后左乘 $\boldsymbol{R}_1$ 、 $\boldsymbol{R}_2$ ,

$$\boldsymbol{T}_r = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_2\boldsymbol{R}_1 & \boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.883\ 256 & 0.191\ 537 & -0.427\ 99 & -343.303 \\ -0.141\ 47 & 0.979\ 085 & 0.146\ 22 & -526.414 \\ 0.447\ 041 & -0.068\ 60 & 0.891\ 879 & -240.294 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

(33)

3.4.2 数据融合

对实验杆件的细尺度点云使用变换矩阵 $\boldsymbol{T}_r$ 进行变换。融合结果如图12所示。

3.4.3 融合效果评定

计算经过变换后的两组轮廓信息及主轴方向向量 $\boldsymbol{a}_1$ 、 $\boldsymbol{a}_2$ ,以及另一主方向向量 $\boldsymbol{b}_1$ 、 $\boldsymbol{b}_2$ 。分别计算对应向量之间的夹角 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ , $\theta_1$ 为主轴偏差角, $\theta_2$ 为扭转偏差角。根据《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82—2011),构件连接孔距最大允许偏差不得大于1 mm,偏角最大允许值可定义为:孔距允许最大偏差与杆件长度的比值。其中,统计结果如表2所示。

即可得到旋转后的几何中心。旋转后几何中心的计算结果为

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_{\text{rot}} & \bar{Y}_{\text{rot}} & \bar{Z}_{\text{rot}} \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix} -790.818 & -346.777 & 174.202 \end{bmatrix}^T.$$

(31)

使用式(18)计算旋转后几何中心之间的差值 $T_x$ 、 $T_y$ 和 $T_z$ ,组合为 $\boldsymbol{t}(T_x, T_y, T_z)$ 带入四阶矩阵中得到:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{E} & \boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -343.303 \\ 0 & 1 & 0 & -526.414 \\ 0 & 0 & 1 & -240.294 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

(32)

将上述所有计算结果统一至四阶变换矩阵中,计算结果为

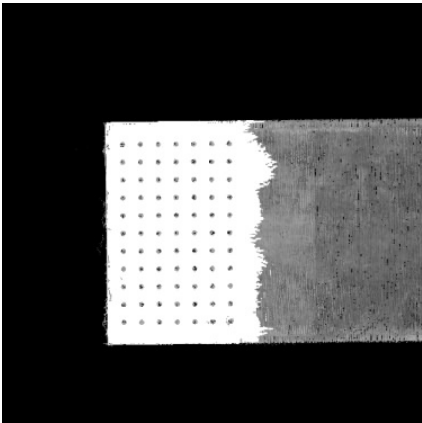


图12 点云融合效果图

Fig.12 Fusion result of the point cloud

表2 融合效果评定参数

Table 2 Evaluation parameters of the fusion result

主轴向量	偏角			豪斯多夫距离	
	偏差角	计算值/(°)	容许最大值/(°)	计算值/mm	容许最大值/mm
$\boldsymbol{a}_1 = (0.881\ 489, -0.145\ 937, 0.449\ 076)$	主轴偏差角 $\theta_1$	0.000 038 4	0.000 167	0.311	1
$\boldsymbol{a}_2 = (0.881\ 492, -0.145\ 94, 0.449\ 078)$					
$\boldsymbol{b}_1 = ( -0.195\ 037, -0.977\ 957, 0.071\ 790)$	扭转偏差角 $\theta_2$	0.011 75	0.025		
$\boldsymbol{b}_2 = ( -0.194\ 84, -0.978\ 16, 0.072\ 48)$					

对比以上计算结果可以看出,融合效果在轴线方向产生了的偏角满足误差容许范围,且在扭转方向产生的偏角也满足了扭转误差容许的范围,融合效果具有较好的连接性。

## 4 结 论

(1)通过立式三维激光扫描和手持式三维激光扫描结合,充分发挥两种技术在点云数据获取上的优势,解决了大尺度杆件对局部信息精度的要求。

(2)笔者基于被提取轮廓信息的对应关系提出了一种计算空间变换矩阵的方法,实现了多尺度点云数据融合。

(3)笔者提出了一种基于轴向偏角、扭转角与连接距离的融合效果评价方法,并通过试验验证,该方法够有效地评价杆件类点云的融合效果。

## 参考文献

- [1] ZUO Zibo, GONG Jian. Applied research on 3D laser scanning technology in civil engineering. [J]. Building construction, 2016, 38(12): 1736 - 1739.
- [2] JOLSEN M, JOHNSTONE E, ESTER F, et al. New automated point-cloud alignment for ground-based light detection and ranging data of long coastal sections [J]. Journal of surveying engineering, 2011, 137(1): 14 - 25.
- [3] 梁栋, 张硕, 赵恺, 等. 某人行桥整体构形的三维激光扫描检测方法[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9): 57 - 66.  
(LIANG Dong, ZHANG Shuo, ZHAO Kai, et al. A 3D laser scanning method for detecting overall configuration of a pedestrian bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2020, 37(9): 57 - 66.)
- [4] MA Yinhuai, JIANG Zhigang, MA Ligang, et al. Dimensional quality assessment of cable-stayed bridge by combining terrestrial and drone laser scanner. [J] Proceedings of the institution of civil engineers-bridge engineering, 2022, 175(2): 105 - 117.
- [5] SUN Guowei, ZHOU Guoqing, GENG Kaitong.

Application of 3D scanner in pre-assembly of steel structure [J]. Construction technology, 2017, 46(S2): 514 - 515.

- [6] GUO Qi, YANG Zhenlong, JI Xiaowei. Research on virtual pre-assembly technology of heavy steel component [J]. Building construction, 2021, 43(9): 1786 - 1788.
- [7] XIANG Liang, LI Youwei. Virtual assembly technology of steel bridge member of bolt connection [J]. Construction technology, 2018, 47(5): 48 - 50.
- [8] CASE F, BEINAT A, CROSILLA F, et al. Virtual trial assembly of a complex steel structure by generalized procrustes analysis techniques [J]. Automation in construction, 2014(3): 155 - 165.
- [9] JIANG Haili, CHEN Lihua, CHENG Xiaojun. A simulation pre-assembly method of steel structure based on line feature matching [J]. Beijing surveying and mapping, 2021, 35(8): 997 - 1001.
- [10] ZHOU Xuhong, LIU Jiepng, CHENG Guozhong. Intelligent virtual trial assembly of large and complex steel arch bridge based on point cloud data [J]. China journal of highway and transport, 2023, 151(10): 48 - 66.
- [11] HABIB A, GHANMA M, MORGAN M. Photogrammetric and lidar data registration using linear features [J]. Photogrammetric engineering and remote sensing, 2005, 71(6): 699 - 707.
- [12] PARMEHR E G, FRASER C S, ZHANG Chunsun, et al. Automatic registration of optical imagery with 3D lidar data using statistical similarity [J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2014, 88(1): 28 - 40.
- [13] ZHAO W Y, NISTER D, HSU S. Alignment of continuous video onto 3D point clouds [C]// Proceedings of the 2004 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. Washington, DC, USA: IEEE, 2004: 964 - 971.
- [14] HOFMANN S, EGGERT D, BRENNER C. Skyline matching based camera orientation from images and mobile mapping point clouds [J]. ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2014, II - 5: 181 - 188.
- [15] LI Na, HUANG Xianfeng, ZHANG Fan, et al. Registration of aerial imagery and lidar data in desert areas using sand ridges [J]. Photogrammetric record, 2015, 30(151): 263 - 278.

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)