

# 采用三维激光扫描精准获得钢构件初始几何缺陷的方法

邹奕翀<sup>1</sup> 胡黎俐<sup>2,3</sup> 冯鹏<sup>3</sup> 李庆伟<sup>3,4</sup> 滕明睿<sup>3</sup>

(1. 中煤科工集团北京华宇工程有限公司, 北京 100120; 2. 上海交通大学, 上海 200240;  
3. 清华大学, 北京 100084; 4. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 钢结构初始几何缺陷是影响构件性能、施工安装的重要因素, 传统测量手段存在效率不高、数据不全、精度不足等问题。采用三维激光扫描技术可以高效、精准地扫描构件外形, 然而获得的点云数据需要进行复杂的处理, 一定程度上限制了该技术的应用。发展了一种构件数字化模型, 分为构件、截面、几何元素三个层次; 提出了基于三维激光点云的数字化模型建立方法, 包括校准固有坐标系、构件点云切片和标注、截面点云分割和标注三个主要步骤; 提出了基于数字化模型的全局和局部初始几何缺陷的计算方法。数字化模型及其建立方法在精确保留扫描细节的同时抽象出了几何特征。采用手持式三维激光扫描仪和自编软件 BCModeler 采集并处理得到了钢构件的整体和局部初始几何缺陷, 验证了方法的有效性。

**关键词:** 三维激光扫描; 钢构件; 初始几何缺陷; 点云; 三维重建

**DOI:** 10.13204/j.gyjzG20110602

## PRECISE MEASUREMENT METHOD OF INITIAL GEOMETRIC IMPERFECTIONS OF STEEL STRUCTURAL MEMBERS USING THREE-DIMENSIONAL LASER SCANNING

ZOU Yichong<sup>1</sup> HU Lili<sup>2,3</sup> FENG Peng<sup>3</sup> LI Qingwei<sup>3,4</sup> TENG Mingrui<sup>3</sup>

(1. Beijing Huayu Engineering Co., Ltd., China Coal Science and Technology Group, Beijing 100120, China;  
2. Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China; 3. Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
4. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Initial geometric imperfection of steel structure is an important factor that affects mechanical performance, construction and installation. Traditional measurement methods have shortages such as low efficiency, incomplete data, and insufficient accuracy. High-precision point clouds of shape of steel members can be efficiently obtained by three-dimensional laser scanning. However, the processing method of the point clouds need to be developed. First, a digital model of structural member is developed, composing of three levels: component, section, and geometric element. Second, a modeling method of the digital model based on laser point cloud was proposed, including calibration of the inherent coordinate system, slicing and labeling member point cloud, segmenting and labeling section point cloud. Third, the calculation method of global and local initial geometric imperfections based on the digital model is proposed. The digital model abstracts geometric features while retaining precise scanning details. Finally, using a handheld 3D laser scanning device and self-made software BCModeler, initial global or local geometric imperfections of an H-section steel column and outer steel tube of a hybrid column are obtained, thus the effectiveness of the method is verified.

**Keywords:** 3D laser scanning; steel member; initial geometric imperfection; point cloud; 3D reconstruction

### 0 引言

钢结构构件在制作、运输和安装的过程中, 不可避免地会产生与设计模型之间的几何偏差, 即初始几何缺陷。初始几何缺陷会引发构件性能的下降, 如初弯曲、初偏心等会影响构件的稳定性, 偏差过大时还会影响构件的连接和安装<sup>[1-3]</sup>。精准测量构件的初始几何缺陷是保证结构性能、预防施工问题, 以

及建立“数字孪生”等实时反映结构性能模型的重要基础<sup>[4-6]</sup>。按照 GB 50205—2020《钢结构工程施工质量验收规范》, 钢构件的初始几何缺陷需在出厂和施

第一作者: 邹奕翀, 男, 1994 年出生, 硕士。

通信作者: 冯鹏, 男, 1977 年出生, 博士, fengpeng@tsinghua.edu.cn。

收稿日期: 2020-11-11

工现场进行验收<sup>[5]</sup>。目前对钢构件的初始几何缺陷的测量工具主要为经纬仪、水平仪、钢尺、卷尺等,存在着效率不高、数据不够全面、精度易受人为因素影响等问题,更难以应对形状复杂的构件<sup>[7-8]</sup>。

三维激光扫描是一种新兴的无接触式测量技术,基于激光测距法或三角测距法的技术原理精准复制物体的外形,具有不接触物体表面、测量精度高、覆盖范围大、工作效率高等优势<sup>[9-11]</sup>。例如,基于激光测距法的地面式三维激光扫描将设备固定于测站并扫描周围环境,将多个测站拼接后可以测量大型结构、大型构件的外形<sup>[9,12-13]</sup>。基于激光三角法和结构光法的手持式扫描仪、工业扫描仪则可测量中小型构件、复杂构件的外形<sup>[14-15]</sup>。这些研究表明,三维激光扫描应用于钢结构检测时,精度、效率优势明显。

目前各种形式的三维激光扫描技术都以点云的格式输出扫描结果,即扫描目标表面的点的集合。点云模型富含细节,但并非抽象的几何模型,因此其尺寸、偏差等信息仍需要基于软件后处理得到。以 Geomagic Qualify 为例,检验点云和设计模型偏差,需经过导入模型、配准、分析和取样等步骤<sup>[16]</sup>。这一过程需要原始设计模型且人工干预多,在一些既有结构检测或需要自动化检测的场景下不易实施。因此,为完善三维激光扫描的应用流程,实现钢构件

初始几何缺陷的自动、精准测量,本文提出了一种基于三维激光点云的构件数字化模型,结合 RANSAC 算法开发了不依赖设计模型自动建立数字化模型和计算初始几何缺陷的方法,编写了 BCModeler 软件。并利用手持式三维激光扫描仪和自编软件对钢构件进行了扫描与处理,验证了本方法的有效性。

## 1 基于三维激光点云获得构件数字化模型的方法

### 1.1 数字化模型的概念

点云模型为缺乏抽象的离散数据集。为反映人们对理想构件几何外形的设计意图和抽象认识,本文基于点云模型,建立了构件-截面-几何元素三个层次的数字化模型<sup>[15]</sup>,如图 1 所示。其中,为了在抽象出截面几何特征的同时最大限度地保留激光点云的丰富细节,本文提出切片组装法:先将构件切片为截面,然后将截面分割为几何元素,最后在几何元素层次标注点云,以此建立构件数字化模型的数据结构和相应的算法。将点构建为切片主要基于以下两点原因:建筑结构中大多数构件为等截面或变截面的杆系构件,其特点在于构件的设计截面沿全长相等或相似,因此构件通常通过截面几何特征来进行命名,如 H 型钢、方管、矩管、圆管等;在广泛应用于大型结构计算的杆系有限元模型中,定义构件截面也是建模的关键步骤。

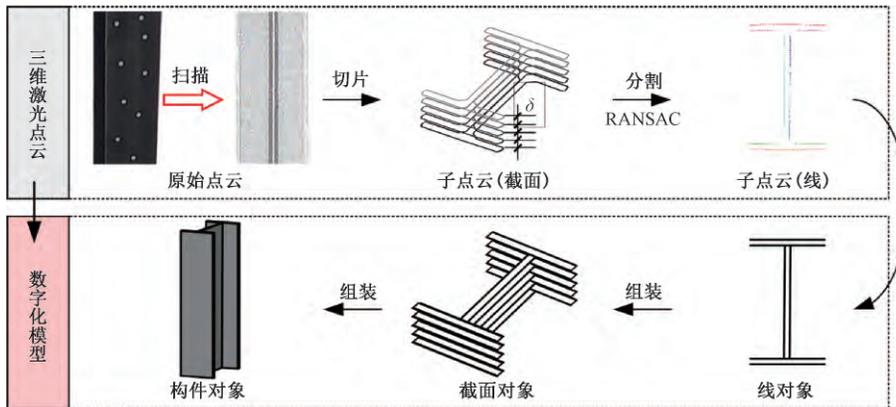


图 1 基于三维激光点云获得构件数字化模型的概念图<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Conceptual drawing of component digital model based on 3D laser point cloud<sup>[15]</sup>

具体而言,通过三维激光扫描获得原始点云后,对点云进行如下处理:1)采用坐标轴校准算法确定构件的固有坐标系,将点云坐标变换到固有坐标系中;2)构件层次的点云切片和标注,即将构件点云沿固有 Z 坐标轴等间距切片并标注为不同截面;3)截面层次的点云分割和标注,即采用 RANSAC 算法<sup>[17]</sup>将单个截面分割为线段等基本几何元素,将各个几何元素的局内点进行标注,排除局外点。经过算法处理后,几何元素和截面重新组装,形成构件的

数字化模型。

### 1.2 数据结构和算法

数字化模型的具体数据结构和算法流程如图 2 所示,算法包含以下 3 个主要步骤。

步骤 1:首先通过下述算法确定构件的固有坐标系。

1)初始化。输入构件点云  $M$ ,分别在构件两端选择两点  $P_1$ 、 $P_0$ ,以粗估 Z 轴方向:

$$n_{z,0} = (P_1 - P_0) / \|P_1 - P_0\|_2$$

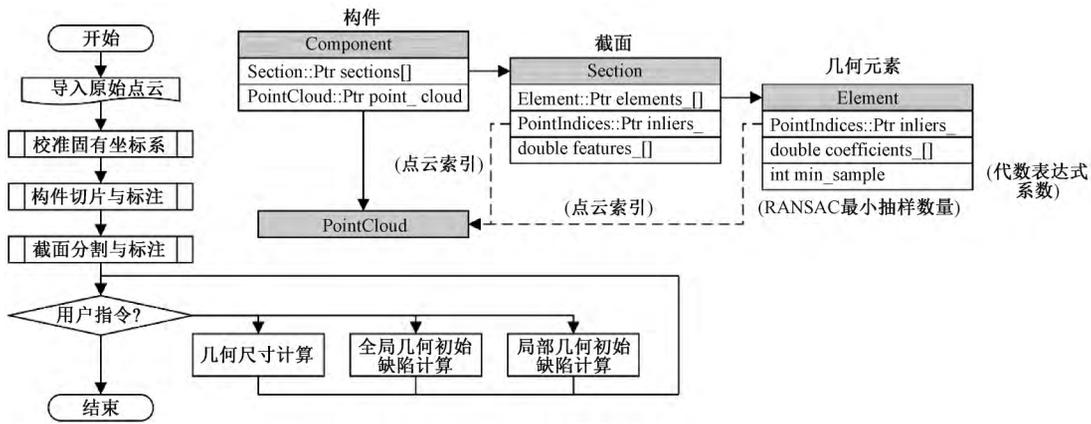


图2 构件数字化模型的数据结构和算法流程

Fig. 2 Data structure and algorithm flow chart of component digital model

式中:  $n_{z,0}$  为构件轴线方向初始值。

2) 迭代。重复以下步骤直到  $\|n_{z,j} - n_{z,j-1}\|_2 \leq$  允许差。

- a. 根据当前  $Z$  轴方向  $n_{z,0}$  提取  $P_0$  和  $P_1$  所在的截面  $S_0$  和  $S_1$ ;
- b. 调用基于 RANSAC 的截面分割算法, 分割并标注截面  $S_0$  和  $S_1$ ;
- c. 根据分割结果, 计算两截面形心为  $P_0$  和  $P_1$ ;
- d. 计算坐标轴方向  $n_{x,0}$ 、 $n_{y,0}$  和  $n_{z,0}$ ;
- e. 如迭代次数超过最大次数  $\max\_iter$ , 则判定校准失败, 返回 1) 重新选点。

3) 校准成功。

- a. 基于  $n_{x,0}$ 、 $n_{y,0}$ 、 $n_{z,0}$  和  $P_0$ , 计算坐标变换矩阵, 对原始点云进行坐标变换:

$$M^* = \left\{ P^* \mid P^* = \begin{bmatrix} n_x^T \\ n_y^T \\ n_z^T \end{bmatrix} (P - P_0) \quad P \in M \right\}$$

- b. 输出变换后点云和坐标变换矩阵。

流程图 3 直观地表述了上述过程, 该算法调用的基于 RANSAC 的截面分割算法则在步骤 3) 中予以说明。

步骤 2: 构件层次的点云切片和标注。

1) 输入切片厚度  $\delta$ , 遍历校准后点云中的所有点, 根据  $Z$  坐标值计算其所属的截面:

$$S_j^* = \{ P^* \in M^* \mid j\delta \leq [0 \ 0 \ 1]^T \cdot P^* \leq (j+1)\delta \} \quad j \in N$$

式中:  $S_j^*$  为第  $j$  个截面的子点云;  $M^*$  为前述坐标变换后的构件点云。

2) 在各个截面对象中, 记录属于该截面的点的索引 (indices) 在构件对象中则通过指针数组指向各个截面对象。

切片厚度不宜过大或过小。切片后的点云在分

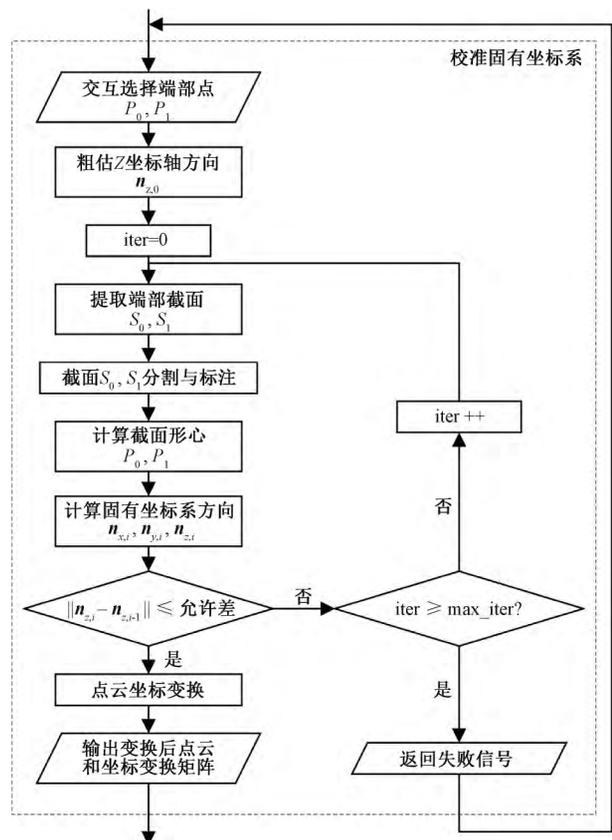


图3 校准构件固有坐标系的子流程

Fig. 3 Subprocess of calibrating component's inherent coordinate system

割时  $Z$  坐标值被忽略, 相当于投影到了同一平面。如厚度过小, 则点云过于稀疏, RANSAC 算法可能无法正确提取其几何元素; 如厚度过大, 则过多的点云被叠加, 可能降低分辨率和精度。合适的厚度需结合扫描设备的分辨率及构件尺寸的条件设置, 本文推荐投影截面上至少每条边有 200 点, 例如, 以 0.5 mm 采样分辨率和 70 mm 边长为例, 采用 2 mm 厚度切片时有  $(70 \times 2) / (0.5 \times 0.5) = 280$  个采样点, 可以满足要求。此外, 通过截面的可视化可以有效地辅助判断。

步骤 3: 截面层次的点云分割和标注。

1) 初始化。

a. 取截面对象作为输入, 设置 RANSAC 算法的阈值 threshold 和迭代次数 max\_iter 以及截面的类型。

b. 获得忽略 Z 坐标值的截面点云作为输入:

$$S_{p,\rho}^* = \left\{ P_p^* \mid P_p^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} P^* \quad P^* \in S^* \right\}$$

c. 根据截面类型确定几何元素类型及数量  $m$ 。

2) 迭代:  $k=1 \sim m$  逐个调用 Ransac 算法执行几何元素  $el_k$  的分割。

a. 初始化 RANSAC 算法。根据  $el_k$  的几何元素类型确定 RANSAC 算法的最小采样数、其代数表达式  $f(P, c_1, c_2, \dots, c_n) = 0$  及系数  $c_1, c_2, \dots, c_n$  的计算方法, 点  $Q$  到该元素的平面距离计算函数  $\text{dist}(el_k, Q)$ 、迭代数  $\text{iter} := 0$ 。

b. 以  $S_{p,k}^*$  作为输入点云, 调用 RANSAC 算法:

①从输入点云  $S_{p,k}^*$  中随机抽取  $n$  个点作为子点集, 即:

$$R_i \subseteq S_{p,k}^* \text{ 且 } \text{card}(R_i) = n;$$

②用  $R_i$  中的样本点标定系数  $c_1, c_2, \dots, c_n$ ;

③遍历  $S_{p,k}^*$  中的所有点, 将与  $el_k$  的平面距离小于等于阈值的点纳入局内点集  $U_i$ , 即:

$$U_i = \{ Q \in S_{p,k}^* \mid \text{dist}(el_k, Q) \leq \text{threshold} \};$$

④如果局内点集  $U_i$  的样本容量不小于本次循环内的最大点集  $U_{\max}$ , 则记录为最大点集  $U_{\max}$ 。即: 如果  $\text{card}(U_i) \geq \text{card}(U_{\max})$  则  $U_{\max} = U_i$ 。

⑤重复上述步骤直到迭代次数 iter 达到最大值 iter\_max。

c. 将最大局内点集标注为属于当前元素  $el_k$  的点集  $E_k := U_{\max}$ , 用其中的所有点重新拟合  $el_k$  的表达式系数  $c_1, c_2, \dots, c_n$ , 可以采用最小二乘法;

d. 用剩余的局外点集作为 RANSAC 分割下一个元素的输入点云, 即:  $S_{p,k+1}^* = S_{p,k}^* - E_k$ 。

e. 重复以上步骤直到完成全部  $m$  个元素的分割与标注。

3) 输出分割后的各个几何元素对象, 完成截面对象的分割。

图 4 对上述整个截面分割标注算法和其中关键的 RANSAC 算法进行了直观的表达。RANSAC 算法为 Fischler 和 Bolles 给出的随机采样一致性 (Random Sample Consensus) 算法。使用 RANSAC, 可以从包含局内值和局外值的一组观测数据中找到与数学模型中最匹配的结果。例如, RANSAC 算法可以从混乱的点云分布中筛选出附近点数最多的几

何模型, 无需人工选点, 经过上述改良后可以逐个精准提取几何元素, 其效果如图 5 所示。

### 1.3 数字化模型的特点

在上述过程中, 点云已被标注了所属截面和所属几何元素, 各点的序号也保存于相应的截面点集和几何元素点集中。在等间距切片的情况下, 截面点集沿高度方向存储于一维数组中, 基于数组序号和切片厚度可以简单换算出截面的高度 ( $Z$  坐标), 而几何元素点集的序号和排列则是一种先验的知识, 例如, 将 H 型钢截面人为依序划分为图 5 所示的 6 条线段, 以此表示构件外观的抽象特征。

因此, 本文建立的数字化模型具备以下两个特点: 1) 首先, 便于对数字化模型进行后续处理。例如, 根据分辨率需求调整切片间距时, 无需重复上述步骤, 仅需要根据各点的  $Z$  坐标重新标注截面点集即可。又例如, 如需计算构件初始缺陷, 则人为建立几何模型或者直接基于端部截面模型进行比对都很方便。本文的第 2 节给出了初始几何缺陷的具体计算方法。2) 此外, 数字化模型对杆系构件有着广泛的适用性。通过对截面的预先定义, 该模型可以实现线段、圆弧等多种元素的组合, 从而实现对 H 型钢、矩管、圆管乃至异形构件等多种形状的杆系构件的建模。本文的第 2 节就分别给出了对 H 型钢、矩形构件的典型应用。

## 2 基于构件数字化模型计算初始几何缺陷的方法

### 2.1 基于数字化模型计算截面尺寸的方法

数字化模型的截面分割和尺寸计算规则是预先定义的, 不同形状的截面需要几何元素数量、类型和需要获取的几何信息也有所不同。以三维激光扫描的 H 形、方形、圆管等构件为例, 表 1 分别给出了这几种截面的三维激光扫描轮廓、几何元素数量和类型, 以及尺寸定义、计算规则。基于 1.2 节的算法和上述规则, 可以计算出沿  $Z$  轴分布的每一个截面的尺寸, 将这些截面的尺寸取平均即可得到具有代表性的构件尺寸。

需要指出的是, 目前本文定义的截面分割规则不一定是最佳的。实际上, 只要给定几何形状的代数表达式和多点标定方法, RANSAC 算法也可以实现对多边形等复杂图形的拟合和分割。例如, H 型钢截面也可以如图 6 所示分割为 3 个矩形, 分别对应上翼缘、下翼缘和腹板, 但实践时容易受到焊缝的影响。因此, 本文提出的规则不失为一种可行的实践, 未来亦可研究和探讨改进的规则, 但这些改进仍不超出 1.2 节的框架。

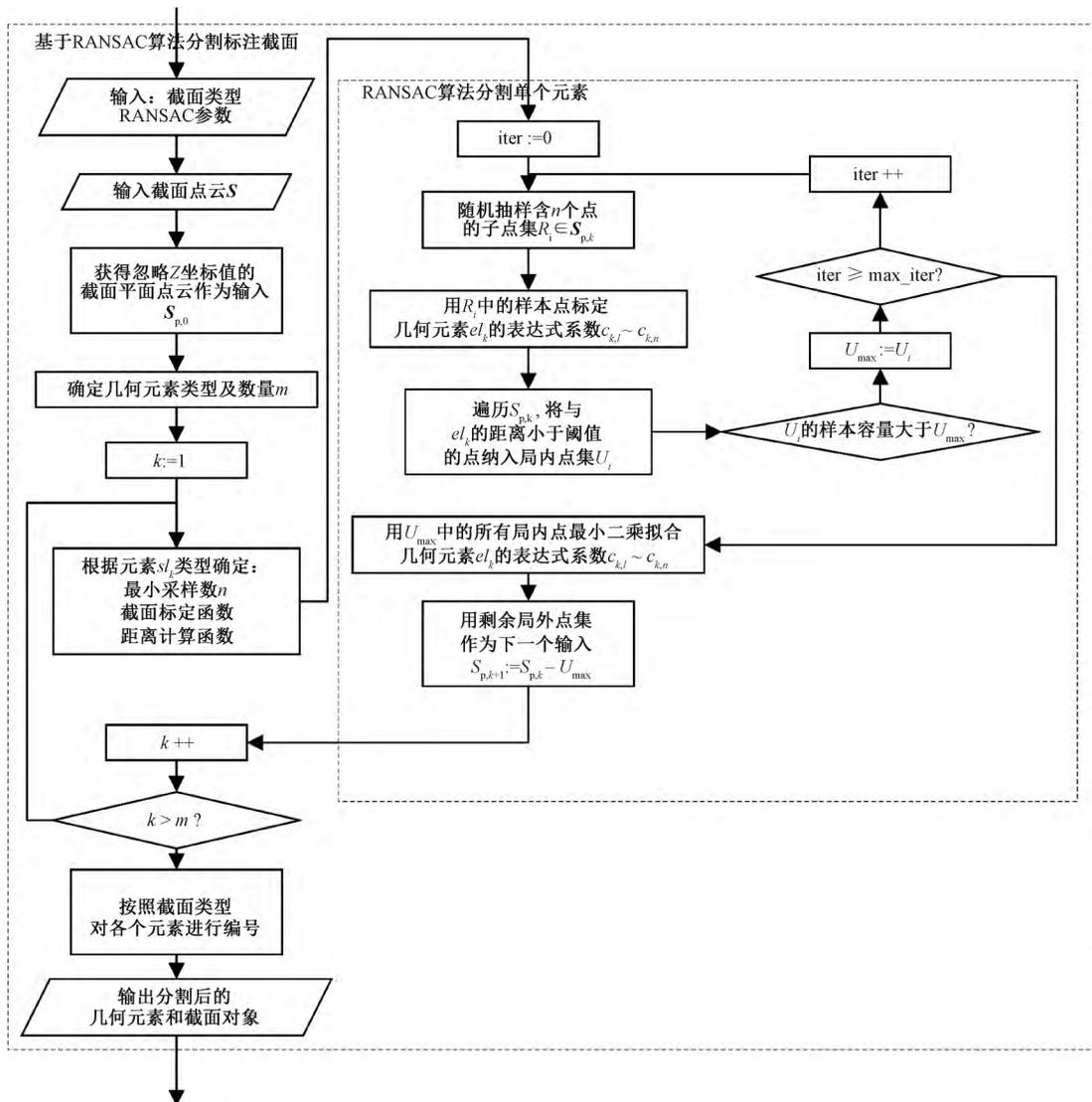


图4 基于 Ransac 算法分割标注截面的子过程

Fig. 4 Subprocess of segmenting and labeling sections based on Ransac algorithm

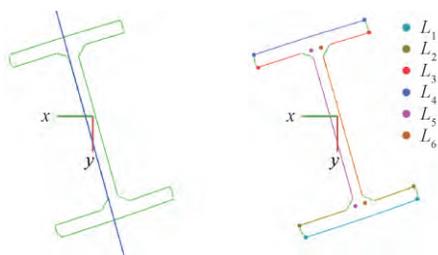


图5 Ransac 算法对 H 型钢三维激光扫描截面的分割效果

Fig. 5 Segmentation of a laser-obtained H-section steel column by Ransac algorithm

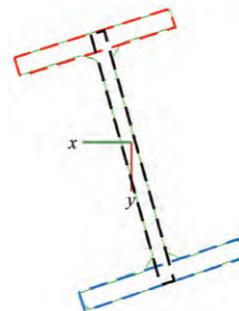


图6 以3个矩形分割 H 型钢截面的示意

Fig. 6 Schematic diagram of 3 rectangles segmenting an H section of a steel column

## 2.2 基于数字化模型计算全局初始几何缺陷的方法

1.2 节的算法已将构件点云中的所有点标注了所属的截面和几何元素。因此,给定一个用于参照的标准截面,即可计算每个点与它对应的标准截面上的位置偏差。本文按照该定义计算全局初始几何

缺陷。如图7所示,点A位于标准截面腹板左边缘的内侧,与该几何元素距离为 $\Delta a$ ,则该点的偏差为 $-\Delta a$ ,而点B位于标准截面上翼缘板上边缘的外侧,与该几何元素距离为 $\Delta b$ ,则该点的偏差为 $+\Delta b$ 。对构件上的所有点进行计算后即得到全局初始几何缺

表 1 常见构件的截面轮廓及处理规则

Table 1 Section profile and processing rules of common components

截面类型	H 形	方形	圆管
几何元素	上翼缘( 线段×2) 腹板( 线段×2) 下翼缘( 线段×2)	对边 1、2( 线段×2) 对边 3、4( 线段×2)	圆管( 圆×2)
尺寸计算	上翼缘宽度=2 个线段长度平均 下翼缘宽度=2 个线段长度平均 上翼缘厚度=2 个线段间平均距离 下翼缘厚度=2 个线段间平均距离 腹板厚度=2 个线段间平均距离 腹板高度=上下翼缘线段间平均距离	边长 1=对边 1 和 2 间平均距离 边长 2=对边 2 和 3 间平均距离	外圆半径=拟合值 内圆半径=拟合值 厚度=外圆半径-内圆半径

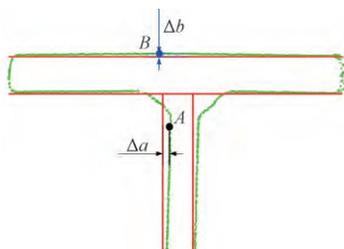


图 7 扫描点与标准截面的偏差计算方法示意

Fig. 7 Schematic diagram of calculating deviation between scanning point and standard section

陷的分布,将各点的偏差按照数值映射到色谱上,分别赋予各点,即可得到可视化的云图效果。

标准截面有两种指定方法: 1) 人为输入几何尺寸的标准截面,其尺寸数据通常取自设计模型,适用于与设计模型的校核; 2) 从数字化模型中指定截面,例如端部截面,其尺寸数据为自动计算,适用于既有构件的现状调查。

### 2.3 基于数字化模型计算局部初始几何缺陷的方法

本文中“局部初始几何缺陷”主要指构件特定区域(例如某一条特征线、某一处方形区域)的几何偏差分布。局部初始几何缺陷可以直接取全局初始几何缺陷在特定区域的子集,也可以定义特定的计算规则。例如,表 2 给出的典型局部初始几何缺陷及其计算规则。

表 2 典型局部初始几何缺陷及其计算规则

Table 2 Typical local geometric initial imperfections and their calculation rules

初始几何缺陷	计算对象	计算方法	计算结果
H 型钢腹板初弯曲	每个截面	计算腹板两侧线段的中点与标准截面腹板的偏差平均值	沿构件全长的腹板初弯曲分布
H 型钢腹板与翼缘夹角	每个截面	通过表达式计算腹板线段与翼缘线段之间的夹角	沿构件全长的腹板翼缘夹角分布
腹板局部平面度	一段截面	采用移动窗口法,按规范 <sup>[5]</sup> 取 1 000 mm 的窗口,沿构件长度方向逐步计算	局部矢高 f

研究钢构件局部几何缺陷的方法有很多种,理论上基于三维激光点云都可以计算出来,因此本文不再针对其他具体项目展开讨论。

## 3 应用

### 3.1 手持式三维激光扫描仪

本文研究中采用的三维激光扫描设备为清华大学土木工程系提供的手持式三维激光扫描仪,型号为 OKIO FreeScan X3,结构光的激光线阵列为 X3+1,空间精度为 0.03 mm,测量范围每扩大 1 m,该值增大 0.08 mm,光学分辨率为 0.1 mm,能够满足实验室条件下的 0.1~6.0 m 构件测量要求。为获得更高的精度,还可以配合使用一套摄影测量系统进行测量。如图 8 所示,试验中需在构件表面粘贴一系列反光标记点,由一人操作一台扫描设备和一台便携式计算机,即可完成扫描。扫描得到的构件点云为 asc 格式,包含 ASCII 编码的物体表面点云三维坐标数据集。这种通用格式的点云文件可以导入商用软件进行处理,

也可自行编程处理。



图 8 三维激光扫描设备和扫描钢柱现场<sup>[15]</sup>

Fig. 8 Equipment and process of scanning a steel column<sup>[15]</sup>

### 3.2 基于本文方法编写的 BCModeler 软件

本文基于点云库 PCL(Point Cloud Library)<sup>[18]</sup>和跨平台软件开发框架 Qt<sup>[19]</sup>,实现了前述算法并设计了简单的图形界面,编写了初版的杆系构件点云处理软件 BCModeler,以处理试验中获得的三维激光点云。将 asc 格式的点云导入该软件后自动转化为 pcd 格式,然后在图形界面设定截面类型、切片间距、RANSAC 算法精度、云图显示等参数,依序完成构件切片、截面分割、初始缺陷计算等操作。该软件具有

交互、可视化和导出数据的功能,其图形界面和可视化结果如图9所示。图中,左方为命令区,布置了按钮、输入框等用于输入命令的控件,右方为QVTK可视化控件,上方两个小控件分别用于显示两个端部截面,而下方的大控件则用于显示构件完整点云。

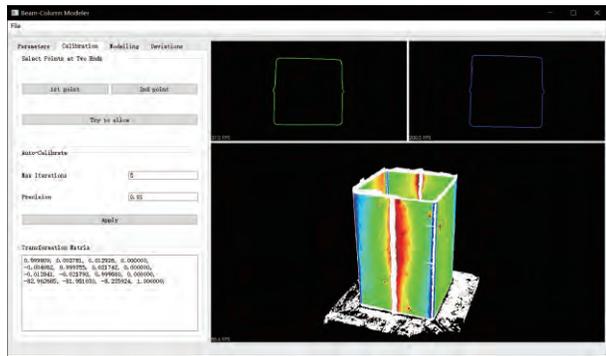


图9 BCModeler 图形界面与可视化结果

Fig. 9 Graphical interface and visualization results of BCModeler

### 3.3 应用 1: H 型钢初始几何缺陷检测

在魏劭杰关于 H 型钢柱受压稳定性加固的研究<sup>[20]</sup>中,采用上述设备采集了 H 型钢的初始几何缺陷。该手持式设备的有效扫描距离为 300 mm 左右,且需要连续的视觉识别反光标靶点,因此从翼缘到腹板转换扫描区域时需要不断调整角度,给扫描带来了一定难度。如果构件具有较深的凹槽形状,则凹槽内部的形状会难以获得。最终,使用本文提出的方法,扫描单个构件的时间控制在 5 min 以内。可见,应用该方法是室内条件下扫描中小型构件的良好方案。扫描结束后,将构件点云导入到 BCModeler 中进行处理,获得了构件的全局初始缺陷分布和腹板处初始缺陷分布,全局初始缺陷结果如图 10 所示。按照前文所述的计算规则计算该构件的实际尺寸并与设计值比较,结果见表 3。

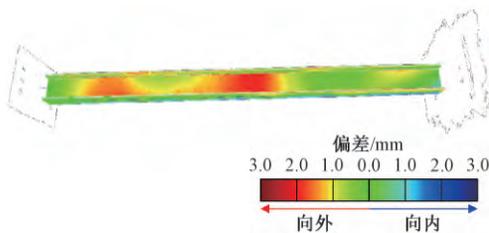


图 10 H 型钢柱全场初始几何缺陷分布

Fig. 10 Full-field initial geometric imperfections of an H-section steel column

获得全局初始缺陷后,对部分局部初始缺陷进行了提取。计算各腹板两侧的偏差平均值可获得该 H 型钢构件腹板的平均挠度值(沿轴向分布),其结果如图 11 所示。此外,提取各切片截面所有翼缘和腹板对应线段的方向测量计算夹角,发现该 H 型

表 3 H 型钢三维激光扫描实测尺寸及误差

Table 3 Size and error of the H-section steel column

项目	measured by 3D laser scanning			mm
	$H$	$B$	$t_w$	$t_f$
实测尺寸	110.96	68.58	5.87	7.84
设计尺寸	110	70	6	8
加工误差	+0.96	-1.42	-0.13	-0.16

钢构件腹板与翼缘之间并非理想的垂直,而存在如图 12 所示的与直角之间的偏差,偏差角度约为  $2.5^\circ$ ,说明板件焊接时存在偏差。

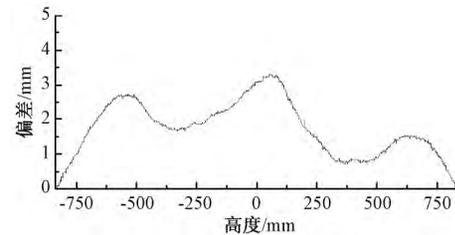


图 11 沿轴向分布的腹板初始挠度

Fig. 11 Distribution of the initial web deflection along the column

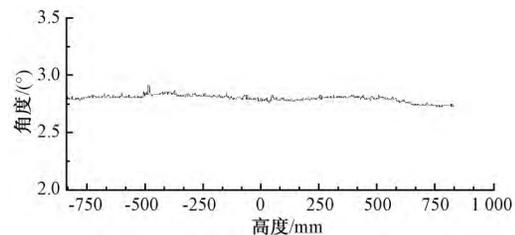
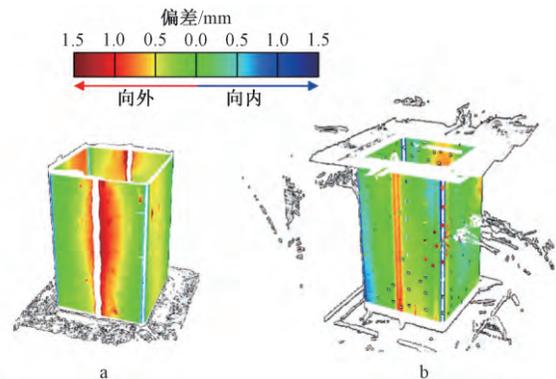


图 12 沿轴向分布的腹板与翼缘夹角与直角的偏差

Fig. 12 Difference between web-flange angle from right angle along the column

### 3.4 应用 2: 组合柱外钢管初始几何缺陷检测

邹奕翀在一项针对组合柱性能的研究<sup>[21]</sup>中,也应用了上述设备测量外部钢管的初始几何缺陷。外钢管为带圆倒角的方形钢管,分别包括双焊缝钢管(气体保护焊,未锉去焊瘤)和单焊缝钢管(电阻焊,锉去焊瘤)。图 13 呈现了两种构件的全局初始几



a—双焊缝钢管; b—单焊缝钢管。

图 13 双焊缝和单焊缝方钢管全局初始几何缺陷分布模式对比

Fig. 13 Comparison of full-field initial geometric imperfection patterns for square steel tubes with double and single welds

何缺陷分布 结果显示,双焊缝钢管在焊缝处会引起焊缝区域附近明显的外凸变形,外凸幅度在 1~2 mm;双焊缝电阻焊构件的焊缝附近的初始缺陷则较小,幅度在 1 mm 以下,且主要分布在冷弯折角附近。二者的初始几何缺陷分布模态和大小有着明显的差异。

#### 4 结论和展望

本文基于三维激光扫描技术建立了精准获得钢结构初始几何缺陷的方法,发展了基于三维激光点云的构件数字化模型和基于数字化模型计算构件初始几何缺陷的系列方法,得到如下结论:

1) 采用三维激光扫描和本文提出的方法检测钢构件,能够精准、快速获得构件毫米/亚毫米级别的尺寸偏差和多种初始几何缺陷,包括缺陷分布模态、板件初弯曲、板件垂直度等。当产生变形时还可进行变形测量。

2) 本文提出的方法适用于方形、工字形等多种杆系构件,在无原始设计模型时,也能获得构件尺寸并检测初始几何缺陷,该特点适合于现场检测。

3) 本文提出的方法可以有效提高钢构件三维点云处理效率,仅需一次设定截面类型、切片厚度等少量参数,即可完成自动检测,适合于钢构件的批量处理、检测。

未来可面向工业检测的需要,将本文方法集成于流水线设备中,用于构件的批量检测。同时进一步完善算法和软件,以适应完全自动化的检测和更复杂多样的截面形式的构件检测的需要。

#### 参考文献

[1] 徐阳. H 型钢柱安装初始缺陷对门式钢结构厂房结构影响分析研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2020.

[2] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京:科学出版社,2011.

[3] FASOULAKIS Z C, LIGNOS X A, AVRAAM T P, et al. Investigation on Single-Bolted Cold-Formed Steel Angles with Geometric Imperfections Under Compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105733.

[4] 史洪泉. 大跨度空间钢结构施工全过程力学分析及考虑施工影响的若干要素研究[D]. 南京:东南大学,2005.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构工程施工质量验收规范:GB 50205—2020[S]. 北京:中国计划出版社,2020.

[6] 李国强,刘玉姝. 一种考虑初始缺陷影响的非线性梁单元[J]. 计算力学学报,2005(1):69-72.

[7] 张学伟,杨志强,马骥. 测绘技术在钢结构施工及验收中的应用研究[J]. 北京测绘,2017(增刊1):198-201.

[8] 张智敏. 球面网壳钢结构安装施工测量技术分析[J]. 科技经济导刊,2019,27(9):101.

[9] 李海泉,杨晓锋,赵彦刚. 地面三维激光扫描测量精度的影响因素和控制方法[J]. 测绘标准化,2011,27(1):29-31.

[10] 邵双运. 光学三维测量技术与应用[J]. 现代仪器,2008(3):10-13.

[11] 杜立彬,高晓辉,夏进军,等. 一种新型激光三维扫描测量仪的研制[J]. 激光技术,2005(4):366-369.

[12] KORUMAZ M, BETTI M, CONTI A, et al. An Integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) Approach for Health Assessment of Historical Structures: A Minaret Case Study [J]. Engineering Structures, 2017, 153: 224-238.

[13] 肖川,魏金满,杨兴盛,等. 三维激光测量技术在钢结构制作中的应用研究[J]. 钢结构,2017,32(12):86-88.

[14] SELVARAJ S, MADHAVAN M. Geometric Imperfection Measurements and Validations on Cold-Formed Steel Channels Using 3D Noncontact Laser Scanner [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(3). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-54X.0001993.

[15] FENG P, ZOU Y C, HU L L, et al. Use of 3D Laser Scanning on Evaluating Reduction of Initial Geometric Imperfection of Steel Column with Pre-Stressed CFRP [J]. Engineering Structures, 2019, 198. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109527.

[16] 陈龙,王传庆,陈桢,等. 三维激光扫描技术在钢结构厂房变形测量中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报,2016,30(5):29-33.

[17] FISCHLER M, BOLLES R. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6):381-395.

[18] LIBRARY P C. Point Cloud Library | The Point Cloud Library (PCL) is a Standalone, Large Scale, Open Project for 2D/3D Image and Point Cloud Processing [EB/OL]. [2020-10-30]. <https://pointclouds.org/>.

[19] COMPANY T Q. Qt-Cross-Platform Software Development for Embedded & Desktop [EB/OL]. [2020-10-30]. <https://www.qt.io/>.

[20] 魏劲杰. 内填充灌浆料复材管加固钢构件压弯性能研究[D]. 北京:清华大学,2019.

[21] 邹奕翀. 内置高强螺旋箍筋的方钢管混凝土组合柱受压性能研究[D]. 北京:清华大学,2020.