

引用本文:刘世龙,马智亮.基于点云的钢筋数量和间距自动检查算法[J].建筑科学与工程学报,2022,39(4):90-99.

LIU Shi-long, MA Zhi-liang. Automatic Inspection Algorithm of Quantity and Spacing of Reinforcement Based on Point Cloud[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4): 90-99.

DOI:10.19815/j.jace.2021.07021

# 基于点云的钢筋数量和间距自动检查算法

刘世龙, 马智亮

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

**摘要:**为改进钢筋骨架质量自动检查方法,提出了基于点云的钢筋骨架中钢筋数量和钢筋间距的自动检查算法。该算法在获取钢筋骨架实际点云和设计点云的基础上,首先对这两片点云分别进行降采样,以得到空间密集程度相同的钢筋骨架实际点云和设计点云;其次,对降采样后的钢筋骨架实际点云和设计点云使用基于主成分分析(PCA)的方法进行粗配准。由于粗配准后的钢筋骨架实际点云和设计点云的配准精度较低,无法直接用于钢筋数量和钢筋间距的检查,对粗配准后的钢筋骨架实际点云和设计点云进行精配准。最后,基于精配准得到的钢筋骨架实际点云和设计点云,依次对钢筋骨架中的钢筋数量和钢筋间距进行检查。结果表明:精配准后的钢筋骨架实际点云和设计点云的配准精度较高,可以用于钢筋数量和钢筋间距的检查;该算法对钢筋数量检查的准确率为100%,对钢筋间距检查的准确率为80%;应用该算法可以有效提高复杂钢筋骨架中钢筋数量和钢筋间距检查的效率,降低人工成本。

**关键词:**点云;钢筋骨架;质量检查;配准;算法

**中图分类号:**TU973.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-2049(2022)04-0090-10

## Automatic Inspection Algorithm of Quantity and Spacing of Reinforcement Based on Point Cloud

LIU Shi-long, MA Zhi-liang

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to improve the automatic inspection method of reinforcement skeleton quality, an automatic inspection algorithm of quantity and spacing of reinforcement in reinforcement skeleton based on point cloud was proposed. On the basis of obtaining the actual point cloud and the design point cloud of reinforcement skeleton, the algorithm firstly downsampled the two point clouds respectively to obtain the actual point cloud and the design point cloud of reinforcement skeleton with the same spatial density. Secondly, the actual point cloud and design point cloud of the reinforcement skeleton after downsampling were roughly registered by using the method based on principal component analysis (PCA). Due to the low registration accuracy of the actual point cloud and design point cloud of the reinforcement skeleton after coarse registration, it could not be directly used for the inspection of the quantity and spacing of reinforcement, the actual

收稿日期:2021-07-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51678345)

作者简介:刘世龙(1991-),男,江苏邳州人,工学博士研究生,E-mail:erickrt@163.com。

通信作者:马智亮(1963-),男,陕西府谷人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:mazl@tsinghua.edu.cn。

point cloud and design point cloud of the reinforcement skeleton after coarse registration were accurately registered. Finally, based on the actual point cloud and design point cloud of the reinforcement skeleton obtained by fine registration, the quantity and spacing of reinforcement in the reinforcement skeleton were checked in turn. The results show that the registration accuracy of actual point cloud and design point cloud of reinforcement skeleton after fine registration is high, which can be used to check the quantity and spacing of reinforcement. The accuracy of the algorithm is 100% for the number of reinforcement inspection and 80% for the spacing of reinforcement inspection. The application of this algorithm can effectively improve the efficiency of checking the number and spacing of reinforcement in complex reinforcement skeleton and reduce the labor cost.

**Key words:** point cloud; reinforcement skeleton; quality inspection; registration; algorithm

## 0 引言

在当前的钢筋混凝土预制构件生产中,构件的钢筋骨架质量检查完全依赖人工。质量检查人员通过计数检查钢筋骨架中钢筋的数量,通过钢尺和卡尺分别测量检查钢筋骨架中钢筋的间距及钢筋的直径,然后将检查结果与设计要求进行对比,以确定钢筋骨架的质量是否符合设计要求。这种完全依赖人工的质量检查方法存在检查效率低、容易产生人为错误等问题。

三维重建技术<sup>[1-4]</sup>和 BIM 技术<sup>[5]</sup>的发展为解决这一问题提供了可能。一方面,基于三维重建技术可以以点云的形式获取钢筋骨架的实际模型,称为实际点云;另一方面,应用 BIM 软件可以建立钢筋骨架的 BIM 设计模型,然后转化为点云形式,称为设计点云。从理论上讲,将实际点云和设计点云进行比对,即可实现钢筋骨架自动质量检查。笔者已经在前期工作<sup>[6]</sup>中分别提出了从 BIM 模型生成钢筋骨架设计点云的方法,以及基于三维重建技术生成钢筋骨架实际点云的方法。在此基础上,本文聚焦于钢筋骨架的自动质量检查。

有关钢筋骨架质量检查方法的研究,Hsua 等<sup>[7]</sup>提出基于增强现实(Augmented Reality, AR)对钢筋骨架中箍筋间距和数量进行检查的方法。该方法基于 BIM 模型生成 AR 模型,然后通过摄像机采集钢筋骨架的图像,接着将该图像与 AR 模型叠加,最后通过人眼观察叠加结果来判断箍筋间距和数量是否符合设计要求。该方法的检查内容局限为箍筋间距和数量,不涉及主筋间距和数量,检查过程需要人工参与,未实现自动检查,也未指出该检查方法的误差有多大。Wang 等<sup>[8]</sup>提出基于三维激光扫描点云对预制构件外露连接钢筋间距进行检查的方法。根

据该方法,首先基于点间平均距离和 RGB 颜色去除三维激光扫描点云中的噪点,然后提取所有钢筋点云,接着识别出单根钢筋的点云,最后估计外露连接钢筋沿某一坐标轴的间距。该方法的检查对象局限于预制构件外露连接钢筋,这种钢筋相互平行,没有交叉,其检查内容只是互相平行的钢筋沿某一方向的间距。Kim 等<sup>[9]</sup>提出基于三维激光扫描仪的钢筋骨架和模板质量检查方法。该方法包括 4 步,即点云数据获取、噪点去除、模板和钢筋识别以及尺寸估计。通过该方法只能得到横向主筋间距和纵向主筋间距、模板尺寸、混凝土保护层厚度。

综上所述,现有研究提出的钢筋骨架质量检查方法存在以下不足。首先,实际工程中使用的预制构件钢筋骨架较为复杂,不仅包含主筋和箍筋,还包括分布筋等,而现有研究提出的方法针对的检查对象较为简单,难以适应复杂钢筋骨架的需求。其次,根据规范<sup>[10]</sup>,钢筋骨架的检查内容不仅包含钢筋间距,也包含钢筋数量和钢筋直径,而现有研究提出的钢筋间距检查方法尚未实现主筋和箍筋的间距检查,更不用说钢筋的直径。

为此,本文提出了钢筋骨架中钢筋数量和间距自动检查算法。首先介绍该算法的框架,然后对该框架中的关键步骤进行说明,最后通过试验验证该算法的有效性。提出的算法能够实现工程中复杂钢筋骨架的钢筋数量和间距的自动检查,从而提高预制钢筋混凝土构件钢筋骨架的质量检查效率,降低人工成本。

## 1 钢筋骨架自动质量检查算法框架

为实现钢筋骨架中钢筋数量和间距的自动检查,需要解决 2 个问题,一个是如何实现钢筋骨架实际点云与设计点云的高精度配准,另一个是如何基

于高精度配准结果实现钢筋骨架中钢筋数量和间距的自动检查算法。针对第一个问题的解决思路是,对钢筋骨架实际点云和设计点云依次进行粗配准和精配准。针对第二个问题的解决思路是,针对钢筋骨架中钢筋的特点,分别设计钢筋数量和钢筋间距的检查算法。在以上思路的基础上,本文提出了如图 1 所示的基于点云的钢筋骨架中钢筋数量和间距的自动检查算法框架。

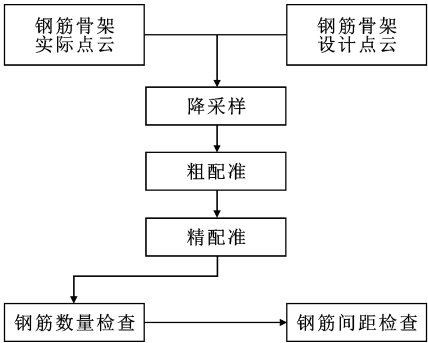


图 1 算法框架  
Fig. 1 Algorithm Framework

在该算法框架中,首先对钢筋骨架实际点云和设计点云分别进行降采样,以得到空间密集程度相同的实际点云和设计点云。然后对降采样后的钢筋骨架实际点云和设计点云进行粗配准。接着对粗配准得到的钢筋骨架实际点云和设计点云进行精配准,以得到二者高精度的配准结果。最后基于前述配准结果依次对钢筋骨架进行钢筋数量和钢筋间距检查。以上各步骤均由程序自动执行,无需人工参与。

需要说明的是,钢筋骨架的设计点云基于笔者前期工作<sup>[6]</sup>提出的方法自动生成,点云中的每个点不仅包含三维坐标信息,还包含该点属于哪根钢筋的语义信息。钢筋骨架实际点云由结构光相机在多个位置扫描的多片点云按照优化后的位姿对齐得到,其中点云中的每个点不仅包含三维坐标信息,还包含该点属于哪次扫描的语义信息。这里的多片点云亦可以用其他三维扫描方法,例如立式三维扫描仪得到。

## 2 钢筋骨架中钢筋数量和间距的自动检查算法关键步骤

在图 1 算法框架中,降采样步骤使用基于体素的方法<sup>[11]</sup>,该方法较为成熟,这里不再赘述。精配准步骤使用基于 TrICP 的高精度精配准方法,这里亦不再赘述。以下详细说明粗配准、钢筋数量检查以及钢筋间距检查 3 个关键步骤。

### 2.1 粗配准

本步骤使用文献[12]提到的主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)算法进行粗配准。

PCA 算法常用于降低数据集的维度,同时尽可能保持原数据集的信息量<sup>[13]</sup>。以点云为例,其基本原理<sup>[14]</sup>是,对点云依次进行标准化、协方差矩阵计算、特征值和特征向量计算操作,最终生成点云的主成分,这些主成分本质上是一系列向量。例如,对于图 2 所示点云,其所在坐标系由 X 轴、Y 轴和 Z 轴构成,利用 PCA 算法处理该点云,可以得到第一、第二和第三主成分,3 个主成分的方向分别与图中的红色 x 轴方向、绿色 y 轴方向和蓝色 z 轴方向相同。可以看出,第一主成分的方向近似沿着点云的最长边,第二主成分的方向近似沿着点云的次长边,第三主成分的方向近似沿着点云的最短边。

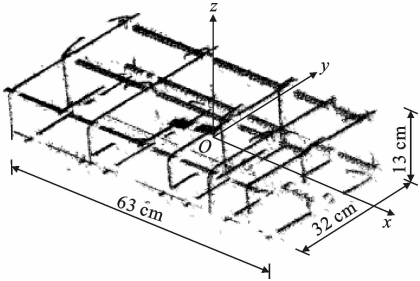


图 2 PCA 算法示例  
Fig. 2 Example of PCA Algorithm

根据 PCA 算法原理可知,使用 PCA 算法分别处理钢筋骨架实际点云和设计点云,能够得到 3 个主成分,而且 3 个主成分构成一个坐标系。虽然钢筋骨架实际点云和设计点云略有差别,但二者对应的钢筋骨架是一样的,所以根据 PCA 算法求得的第一主成分、第二主成分和第三主成分的方向大体相同,3 个主成分构成的坐标系大体相同。

由此可以构建基于 PCA 算法的钢筋骨架实际点云和设计点云粗配准算法。具体来说,首先用 PCA 算法分别对钢筋骨架实际点云和设计点云进行处理,分别得到 3 个主成分,并分别以此构建坐标系。然后将钢筋骨架实际点云和设计点云分别从现有坐标系转换至基于各自主成分构建的坐标系,即可实现钢筋骨架实际点云和设计点云的粗配准。

### 2.2 钢筋数量检查

相比钢筋数量,钢筋是否存在能表示更丰富的信息,即钢筋是否存在不仅能表示各类钢筋各有多少根,而且能清楚地表示缺少的钢筋对应设计要求里的哪根钢筋。因此,本研究将用钢筋是否存在的检查替代钢筋数量的检查。

钢筋骨架实际点云和设计点云在精配准后,同一根钢筋的实际点云与设计点云距离很近。由此可以根据一根钢筋的设计点云附近是否有足够的实际点云来判断该钢筋是否存在。基于这样的思想,本研究设计了如图 3 所示的钢筋数量检查算法。

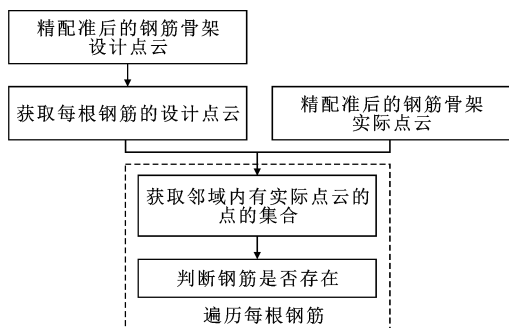


图 3 钢筋数量检查算法

Fig. 3 Algorithm for Inspection of Quantity of Reinforcement

在该算法中,首先从精配准后的钢筋骨架设计点云中获取每根钢筋的设计点云。然后,遍历每根钢筋,对每根钢筋执行以下步骤:①对该根钢筋设计点云中的每个点,判断其领域内是否有精配准后钢筋骨架实际点云中的点,如果有则将该点加入集合  $N$ ;②根据集合  $N$  中的点数和该根钢筋设计点云中的点数,判断该根钢筋是否存在。遍历完成后,即可实现钢筋骨架中钢筋数量的检查。

#### 2.2.1 获取每根钢筋的设计点云

本步骤基于钢筋骨架设计点云中的语义信息,获取每根钢筋的设计点云,以便后续对每根钢筋是否存在进行检查。这里的语义信息指的是钢筋 ID<sup>[1]</sup>,具体来说分为 2 个子步骤。

首先,获取钢筋 ID 集合。遍历钢筋骨架设计点云中的每个点,把每个点的语义信息加入集合 IDs 中。遍历完成即可得到钢筋 ID 的集合 IDs。需要说明的是,若集合 IDs 中有重复的钢筋 ID,则对重复的钢筋 ID 只保留一个。

其次,获取每个钢筋 ID 对应的点的集合,即每根钢筋的设计点云。对于集合 IDs 中的每个钢筋 ID,遍历钢筋骨架设计点云中的每个点,若该点的语义信息与该钢筋 ID 相同,则把该点加入该钢筋 ID 对应的钢筋设计点云中,该钢筋设计点云初始点数为 0。遍历完钢筋骨架设计点云中的每个点,即可得到该钢筋 ID 对应的钢筋设计点云。遍历完集合 IDs 中的每个 ID,即可得到每根钢筋的设计点云。

#### 2.2.2 获取邻域内有实际点云的点的集合

本步骤的目的是将钢筋设计点云中每个点附近的钢筋实际点云中的点加入集合  $N$ ,每个点的附近区域用该点的邻域表示。对每个点,以该点为中心,以  $r$  为半径的球体即为该点的邻域。

本步骤的具体过程是,遍历钢筋设计点云中的每个点,对每个点,判断其以  $r$  为半径的邻域内是否有钢筋实际点云中的点,如果有,则将该钢筋设计点云中的点加入集合  $N$ 。

本步骤中, $r$  的值应小于钢筋骨架中钢筋间距的最小值,否则钢筋设计点云中某些点的邻域可能包含其他钢筋实际点云中的点,从而影响钢筋数量检查结果的准确性。考虑到工程上钢筋骨架中钢筋间距的最小值约为 20 mm,所以本步骤中的  $r$  取 15 mm。

#### 2.2.3 判断钢筋是否存在

在获取每根钢筋设计点云对应的集合  $N$  后,即可根据式(1)的结果  $R$  判断该根钢筋是否存在。

$$R = \frac{\text{size}(N)}{\text{size}(Q)} \quad (1)$$

式中: $\text{size}(N)$  为集合  $N$  的点数; $\text{size}(Q)$  为该钢筋设计点云的点数。

通常由于钢筋之间相互遮挡,钢筋实际点云有缺失,所以  $\text{size}(N) < \text{size}(Q)$ 。此外,对于一根钢筋,其被遮挡部分的长度要小于未被遮挡部分的长度,所以式(1)的取值范围为 0.5~1.0。若式(1)的值大于 0.5,则该根钢筋存在,否则不存在。

### 2.3 钢筋间距检查

如果某根钢筋存在,则进行与之相关的钢筋间距检查,否则不进行与之相关的钢筋间距检查。

根据钢筋形状的不同,可以将钢筋骨架中的钢筋分为 2 类:一类是只有平直段的钢筋,例如主筋和分布筋,如图 4(a)所示;另一类既有平直段又有弯曲段,例如箍筋,如图 4(b)所示。

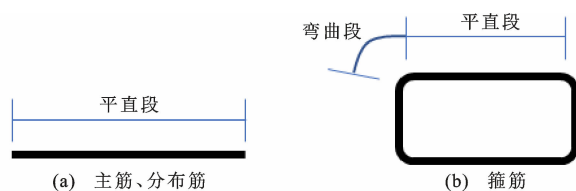


图 4 钢筋平直段和弯曲段示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of Straight Section and Curved Section of Reinforcement

由于钢筋的直径远远小于其长度,所以钢筋的平直段可以用直线段表示,弯曲段可以用曲线段表

示。由此,钢筋骨架中的主筋和分布筋可以简化为直线段,而箍筋可以简化为直线段和曲线段的组合。由于 2 条直线段间的间距求解比较简单,因此可以根据钢筋的实际点云获取近似表示该钢筋的直线段,然后用直线段间距的计算替代钢筋间距的计算,从而实现钢筋间距的计算。基于此,本文提出了如图 5 所示的钢筋间距检查算法。

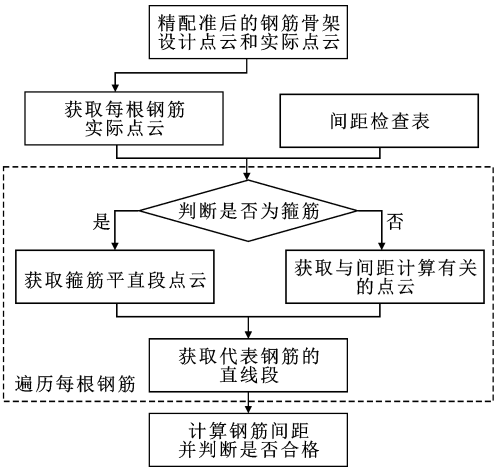


图 5 钢筋间距检查算法

Fig. 5 Algorithm for Inspection of Spacing of Reinforcement

由于钢筋骨架存在多种类型的钢筋,且钢筋横竖交错,难以通过自动的方式从钢筋骨架实际点云和设计点云中判断需要检查哪些钢筋的间距,因此在图 5 中引入间距检查表。间距检查表对应于待检查钢筋骨架的 BIM 模型,是一个文本文件,存储的信息包括钢筋 ID、是否为箍筋、与其相邻钢筋的 ID、设计间距。间距检查表通过手工或半自动的方式在钢筋骨架中钢筋数量和间距的自动检查之前生成。间距检查表的生成不影响钢筋间距检查算法的自动进行。

在钢筋间距检查算法中,首先从精配准后的钢筋骨架实际点云中提取每根钢筋的实际点云。接下来遍历每根钢筋,并对每根钢筋做如下处理:根据间距检查表判断其是否为箍筋。如果这根钢筋是箍筋,则获取其平直段点云;如果不是,则获取与间距计算有关的点云。至此,无论这根钢筋是否为箍筋,均得到了其平直段点云。然后,根据这根钢筋的平直段点云获取能代表该钢筋的直线段。遍历每根钢筋完成后,基于代表钢筋的直线段计算需要进行间距检查的 2 根钢筋的间距,并将该间距与间距检查表中的设计间距对比,从而判断钢筋间距是否符合设计要求。以下对各关键步骤进行说明。

2.3.1 获取每根钢筋实际点云

本步骤的目的是从精配准后的钢筋骨架实际点云中获取每根钢筋的实际点云。

本步骤将以每根钢筋的设计点云为基础,获取每根钢筋的实际点云。每根钢筋的设计点云获取方法已经在第 2.2 节钢筋数量检查中介绍,这里不再赘述。获取某根钢筋实际点云的过程是,对于该根钢筋,遍历其设计点云中的每个点,获取该点以  $r$  为半径的邻域中所有精配准后的钢筋骨架实际点云中的点,并把这些点加入集合  $P$ 。遍历完成后,即可得到该根钢筋的实际点云  $P$ 。对每根钢筋均进行上述处理,即可得到每根钢筋实际点云。需要说明的是,如果  $P$  中存在重复的点,则这些重复的点只保留一个。 $r$  的取值与第 2.2.2 节中  $r$  的取值相同。

2.3.2 判断是否为箍筋

本步骤的目的是判断钢筋是否为箍筋,以便为其选择合适的后续处理步骤。

因为间距检查表中包含钢筋是否为箍筋的信息,所以本步骤结合间距检查表来实现钢筋是否为箍筋的判断。具体来说,首先读取间距检查表并解析。然后从与钢筋实际点云对应的设计点云中提取钢筋 ID。接着根据该钢筋 ID 在解析后的间距检查表获取该钢筋是否为箍筋的信息,即可实现钢筋是否为箍筋的判断。

2.3.3 获取箍筋平直段点云

本步骤的目的是从箍筋实际点云中提取属于平直段的点云。本步骤基于随机采样一致 (Radnom Sample Consensus, RANSAC) 算法实现箍筋平直段点云的获取。其中几何模型选择直线,因为箍筋平直段点云均在该平直段的轴线附近,且该轴线为直线。通常箍筋含有 4 个平直段,且其中 2 个平直段较长,点云较多,而另外 2 个平直段较短,点云较少。根据 RANSAC 算法的原理<sup>[15]</sup>可知,RANSAC 算法能够输出较长平直段的点云,但究竟得到的是哪一个较长平直段的点云则难以确定。

通常钢筋骨架平放在模板上,主筋和分布筋平行于模板,而箍筋所在平面垂直于模板,箍筋 2 个较长的平直段则平行于模板,如图 6 所示。在精配准步骤,钢筋骨架实际点云所在坐标系转换为钢筋骨架设计点云所在坐标系。由于钢筋骨架设计点云所在坐标系来自于粗配准步骤中 PCA 算法的处理结果,且该坐标系的  $z$  轴垂直于模板向上。精配准后钢筋骨架实际点云所在坐标系的  $z$  轴垂直于模板向上。因此,上述基于 RANSAC 算法获取的箍筋较



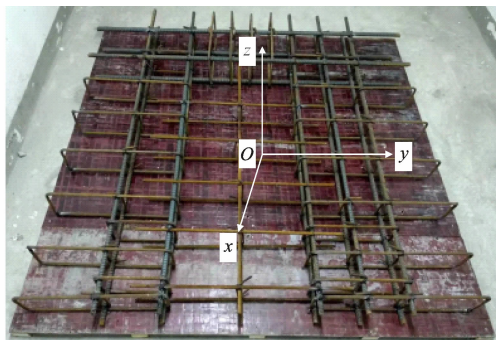


图6 钢筋骨架

Fig. 6 Reinforcement Skeleton

长的2个平直段点云中,总是一个平直段点云中每个点的 $z$ 值均大于另一个平直段点云中每个点的 $z$ 值。可以统一选择 $z$ 值较大的平直段点云作为获取的箍筋平直段点云,从而有利于后续对箍筋间距的计算。

本步骤的具体流程为:首先用以直线为几何模型的RANSAC算法处理箍筋实际点云,获取该箍筋第一个平直段点云;然后在该箍筋实际点云中去除第一个平直段点云,用以直线为几何模型的RANSAC算法对剩下的点云进行处理,得到该箍筋的第二个平直段点云;最后选择 $z$ 值较大的平直段点云作为本步骤输出的箍筋平直段点云。

需要说明的是,本步骤提取的箍筋平直段点云不含有与该箍筋相交的其他钢筋的点云,所以本步骤输出的箍筋平直段点云不含与计算间距无关的点。

#### 2.3.4 获取与间距计算有关的点云

若钢筋不是箍筋,即钢筋为主筋或分布筋,则执行此步骤。

获取每根钢筋实际点云的步骤是基于参数 $r$ 获取每根钢筋实际点云,所以钢筋实际点云中会包含与该钢筋相交的其他钢筋的点云。后者与间距计算无关,它的存在会影响间距的计算,因此需要从钢筋实际点云中获取与间距计算有关的点云。

由于主筋和分布筋没有弯曲段,只有平直段,所以可以用以直线为几何模型的RANSAC算法获取平直段点云,从而提取与间距计算有关的点云。具体流程为,用以直线为几何模型的RANSAC算法处理钢筋实际点云,所得内点即为与间距计算有关的点云。

#### 2.3.5 获取代表钢筋的直线段

本步骤的目的是根据钢筋的平直段点云,计算直线段,从而简化钢筋的表示,方便后续钢筋间距的

计算。

在“获取箍筋平直段点云”和“获取与间距计算有关的点云”2个步骤中,RANSAC算法会输出与平直段点云相关的直线参数,该直线的位置和方向与钢筋平直段的轴线位置和方向近似,所以本步骤基于该直线和平直段点云获取代表钢筋的直线段。

本步骤的具体流程为:首先将钢筋平直段点云中每个点向该直线投影,并计算投影点;然后获取欧式距离最大的2个投影点。其方法为在所有投影点中任取一点,计算其他所有投影点与该点的欧式距离,记欧式距离最大的一个投影点为 $a$ 。最后,计算所有其他投影点与 $a$ 的欧式距离,记欧式距离最大的投影点为 $b$ 。 $a$ 和 $b$ 即为欧式距离最大的2个投影点,亦为直线段的2个端点。至此,得到了代表该钢筋的直线段。

#### 2.3.6 计算钢筋间距并判断是否合格

在本步骤中用代表钢筋直线段的间距计算来替代钢筋间距的计算。

规范<sup>[10]</sup>规定钢筋间距的检查方法为,用钢尺在需要检查间距的2根钢筋的2个端部和中间各量测1次距离,然后计算3次量测距离与设计间距的最大偏差值,再将该最大偏差值与规范容许最大偏差值比较。

本文基于该检查方法设计本步骤的流程。假定需要检测间距的2根钢筋的直线段分别为 $m$ 和 $n$ ,首先分别计算直线段 $m$ 的2个端点和 midpoint 距离直线段 $n$ 所在直线的欧式距离。其次分别计算直线段 $n$ 的2个端点和 midpoint 距离直线段 $m$ 所在直线的欧式距离。然后计算这实际间距与设计间距的最大偏差值,判断钢筋间距是否合格。如果最大偏差值大于规范容许最大偏差值,则不合格,否则合格。

## 3 试验验证

为了验证本文提出的算法的可行性,开展了相关试验。首先根据标准图集建立了钢筋骨架的BIM模型,并根据该BIM模型实际制作了钢筋骨架试件。其次用文献[6]中的方法获取该钢筋骨架的设计点云,并基于图优化方法获取该钢筋骨架的实际点云。最后用本文提出的算法处理该钢筋骨架的实际点云和设计点云,并分析钢筋数量和间距检查结果的准确率。

### 3.1 试验数据准备

本试验根据标准图集<sup>[16]</sup>建立的钢筋骨架BIM模型如图7所示,用文献[16]中的方法得到该钢筋

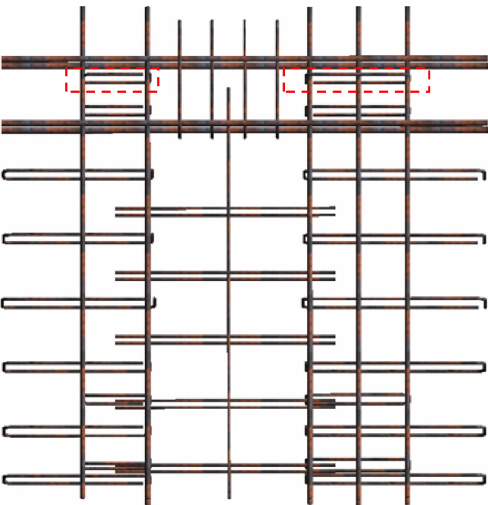


图7 钢筋骨架 BIM 模型

Fig. 7 BIM Model of Reinforcement Skeleton

骨架的设计点云如图 8 所示。根据该 BIM 模型建立的钢筋骨架及其尺寸如图 9 所示。由于工人制作钢筋时粗心,导致实际制作的钢筋骨架缺少 2 根箍筋,这 2 根箍筋如图 7 中虚线所示。本试验基于图优化方法得到该钢筋骨架的实际点云,如图 10 所示。

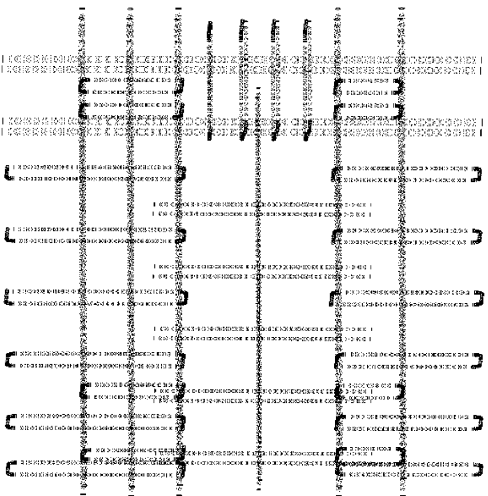


图8 钢筋骨架设计点云

Fig. 8 Design Point Cloud of Reinforcement Skeleton

当前预制构件厂在预制钢筋混凝土构件钢筋骨架制作中普遍采用焊接封闭箍筋,而非普通封闭箍筋,所以图 9 中的钢筋骨架也采用焊接封闭箍筋。然而,目前在主流 BIM 建模软件 Revit 中尚不能绘制焊接封闭箍筋,只能绘制普通封闭箍筋,这将导致箍筋的 BIM 模型与实际情况不同,给钢筋骨架质量检查带来不良影响。为了让钢筋骨架 BIM 模型能够与钢筋骨架的实际情况吻合,本研究采取的措施是,在 Revit 软件中绘制有开口的箍筋,开口长度为 20 mm,如图 11 所示。由于箍筋开口较小,所以

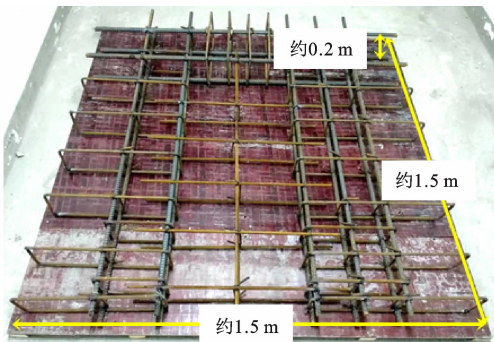


图9 钢筋骨架及其尺寸

Fig. 9 Reinforcement Skeleton and Its Size

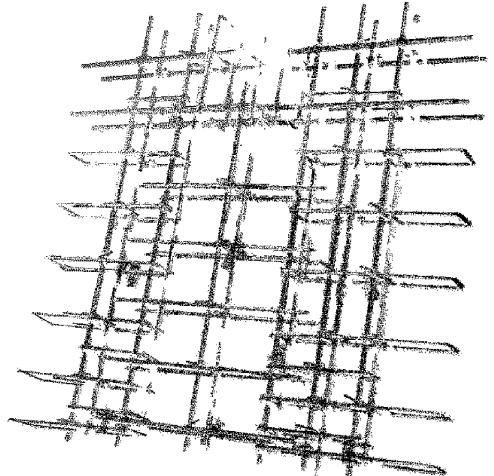


图10 钢筋骨架实际点云

Fig. 10 Actual Point Cloud of Reinforcement Skeleton



图11 在 Revit 中绘制的有开口箍筋

Fig. 11 Stirrup with Openings Drawn in Revit

对钢筋骨架质量检查带来的影响可以忽略不计。

间距检查表通过手工录入生成,其包含的信息为钢筋 ID,是否为箍筋,与其相邻钢筋的 ID、设计间距。由于间距检查表中的信息包括钢筋 ID 和相邻钢筋 ID,所以 2 根相邻钢筋会在间距检查表中产生 2 条数据,即“钢筋 ID1,相邻钢筋 ID2,……”和“钢筋 ID2,相邻钢筋 ID1,……”,这会导致钢筋间距的重复计算,降低算法的效率。为此,在间距检查表中对相邻钢筋只保留一条数据。

由于试验所用钢筋骨架中钢筋种类较多,且同种钢筋的轴线方向可能不同,所以只对同种钢筋中

轴线方向相同的钢筋检查间距。

此外,由于试验所用钢筋骨架包含主筋、箍筋和分布筋,且每种钢筋数量较多,为了后续更方便地表示试验结果,预先对各钢筋进行编号,如图 12、13 中数字所示。图 12 表示平放在模板上的钢筋骨架的上层钢筋,图 13 表示平放在模板上的钢筋骨架的下层钢筋,箍筋的编号只在图 12 中出现。

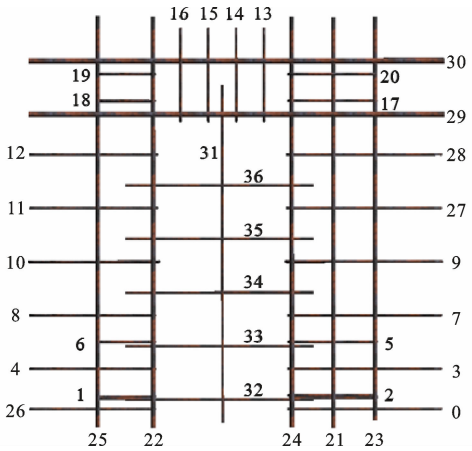


图 12 钢筋骨架上层钢筋的编号

Fig. 12 Number of Upper Reinforcement of Reinforcement Skeleton

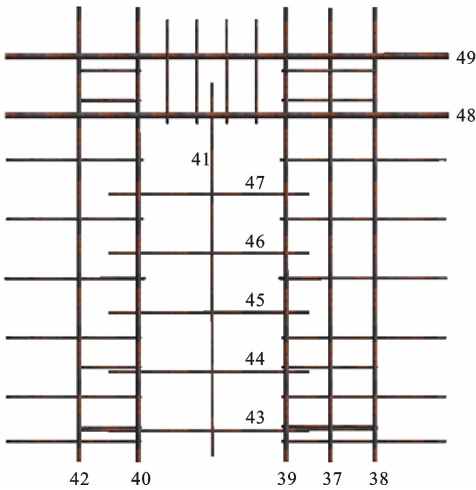


图 13 钢筋骨架下层钢筋的编号

Fig. 13 Number of Lower Reinforcement of Reinforcement Skeleton

### 3.2 钢筋数量检查试验结果

使用本文提出的算法对第 3.1 节的试验数据进行处理,即可得到钢筋数量检查结果。手动将该检查结果可视化,如图 14 所示。在图 14 中,钢筋旁边的数字代表该根钢筋的编号,钢筋旁边的“是”和“否”分别表示本文提出的算法检查到这根钢筋是否存在。

从图 14 可以看出,本文算法检测到有 2 根钢筋

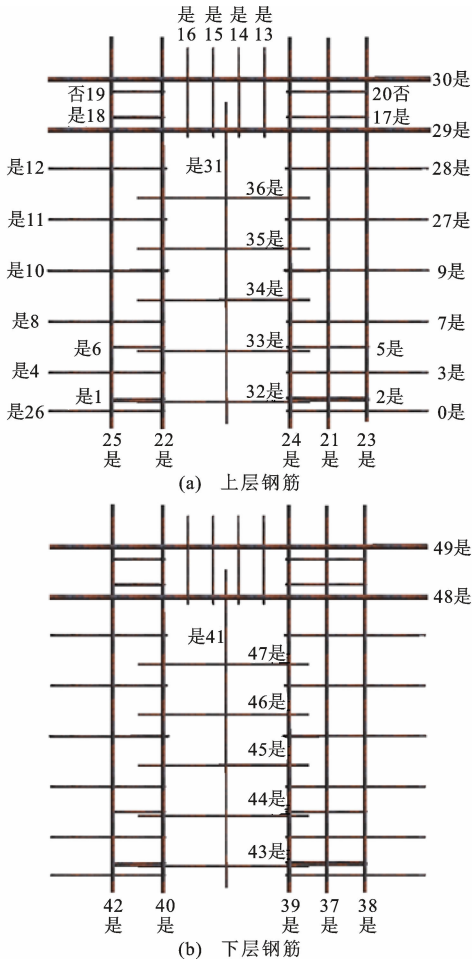


图 14 钢筋数量检查结果

Fig. 14 Inspection Results of Quantity of Reinforcement

不存在,而其余钢筋都存在。这 2 根不存在的钢筋正是图 9 中被工人由于粗心而忘记绑扎的钢筋。从试验结果可以得到,本文提出的钢筋数量检查算法可以检查钢筋骨架中每根钢筋是否存在,且检查结果的准确率为 100%。

### 3.3 钢筋间距检查试验结果

使用本文提出的算法对第 3.1 节的试验数据进行处理,即可得到钢筋间距的检查结果。钢筋间距检查结果可以分为 4 种情况:

- (1)钢筋间距实际合格,被算法判定为合格,这称为 True Positive(TP)。
- (2)钢筋间距实际合格,被算法判定为不合格,这称为 False Negative(FN)。
- (3)钢筋间距实际不合格,被算法判定为合格,这称为 False Positive(FP)。
- (4)钢筋间距实际不合格,被算法判定为不合格,这称为 True Negative(TN)。

将钢筋间距检查结果可视化,如图 15 所示。在



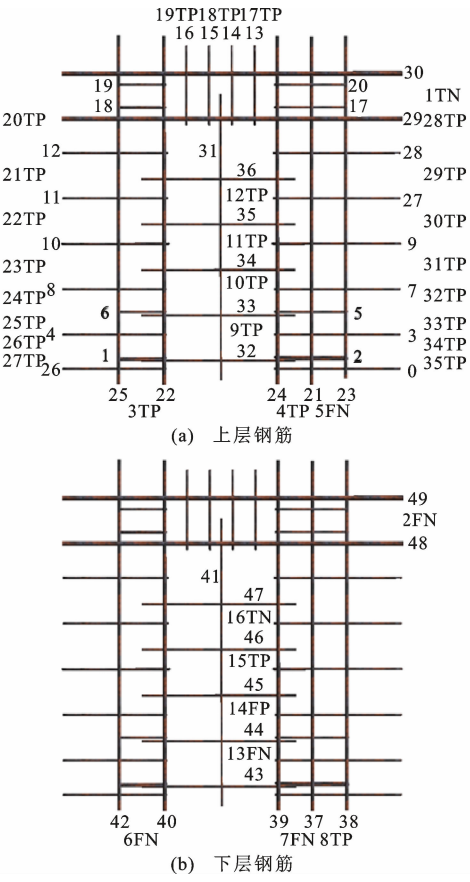


图 15 钢筋间距检查结果

Fig. 15 Inspection Results of Spacing of Reinforcement

图 15 中,“nTP”“nFN”“nFP”和“nTN”中的  $n$  表示钢筋间距的编号。

把属于 True Positive 情况的钢筋间距个数记为  $n_{TPs}$ ,属于 False Negative 情况的钢筋间距个数记为  $n_{FNs}$ ,属于 False Positive 情况的钢筋间距个数记为  $n_{FPs}$ ,属于 True Negative 情况的钢筋间距个数记为  $n_{TNs}$ 。显然,当  $n_{TPs}$  和  $n_{TNs}$  越大,  $n_{FNs}$  和  $n_{FPs}$  越小,钢筋间距检查结果就越好。本试验钢筋间距检查结果中,  $n_{TPs}$  为 23,  $n_{FPs}$  为 1,  $n_{FNs}$  为 6,  $n_{TNs}$  为 5。

本文以精确率 (Precision, 记为  $P$ ) 和准确率 (Accuracy, 记为  $A$ ) 来衡量钢筋间距检查结果,其计算公式分别如式(2)、(3)所示。

$$P = \frac{n_{TPs}}{n_{TPs} + n_{FPs}} \quad (2)$$

$$A = \frac{n_{TPs} + n_{TNs}}{n_{TPs} + n_{FPs} + n_{TNs} + n_{FNs}} \quad (3)$$

根据以上公式可得,本试验中钢筋间距检查结果的准确率为 80%,精确率为 95.8%。这说明实际钢筋间距合格且被算法判定为合格和实际钢筋间距不合格且被算法判定为不合格的个数占总个数的比例为 80%,实际钢筋间距合格且被算法判断为合格

的个数占有所有被算法判断为合格的个数的比例为 95.8%。

## 4 结 语

(1)针对当前研究提出的钢筋骨架质量检查方法不适用于实际工程复杂钢筋骨架,不能兼顾主筋和箍筋质量检查,需要人工参与检查等问题,本文提出了基于点云的钢筋骨架中钢筋数量和间距的自动检查算法。

(2)相比于当前各项研究提出的钢筋骨架质量检查方法,本文提出的基于点云的钢筋骨架质量检查算法能够对工程中复杂钢筋骨架进行自动质量检查,检查内容包括主筋、箍筋和分布筋的数量和间距。该算法在获取钢筋骨架实际点云和设计点云的基础上,首先对这 2 片点云分别进行降采样;其次对降采样后的钢筋骨架实际点云和设计点云进行粗配准;然后对它们进行精配准;最后基于精配准后得到的点云,依次对钢筋骨架中的钢筋数量和钢筋间距进行检查。根据试验结果,钢筋数量检查结果的准确率为 100%,钢筋间距检查结果的准确率为 80%。

(3)本文提出的基于点云的钢筋骨架中钢筋数量和间距的自动检查算法能够有效降低钢筋骨架质量检查工作量,提高钢筋骨架质量检查效率。今后将继续研究钢筋骨架中钢筋直径的自动检测算法,从而彻底解决基于点云的钢架骨架自动质量检查问题。

## 参考文献:

### References:

[1] MA Z, LIU S. A Review of 3D Reconstruction Techniques in Civil Engineering and Their Applications [J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 37: 163-174.

[2] YANG M D, CHAO C F, HUANG K S, et al. Image-based 3D Scene Reconstruction and Exploration in Augmented Reality [J]. Automation in Construction, 2013, 33: 48-60.

[3] SUNG C, KIM P Y. 3D Terrain Reconstruction of Construction Sites Using a Stereo Camera [J]. Automation in Construction, 2016, 64: 65-77.

[4] PATIL A K, HOLI P, LEE S K, et al. An Adaptive Approach for the Reconstruction and Modeling of As-built 3D Pipelines from Point Clouds [J]. Automation in Construction, 2017, 75: 65-78.

[5] WIKIPEDIA. Building Information Modeling [EB/OL]. [2022-03-06]. <https://en.wikipedia.org/wiki/>

- Building\_information\_modeling.
- [6] 刘世龙,马智亮. 基于 BIM 的钢筋骨架语义设计点云自动生成算法[J]. 图学学报, 2021, 42(5): 816-822.
- LIU Shi-long, MA Zhi-liang. BIM-based Algorithm for Automatic Generation of Semantic As-designed Point Cloud of Reinforcement Skeleton[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(5): 816-822.
- [7] HSUA H W, HSIEHA S H. Applying Augmented Reality Technique to Support On-site Rebar Inspection[C]//ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Banff; ISARC, 2019: 1312-1318.
- [8] WANG Q, CHENG J C P, SOHN H. Automated Estimation of Reinforced Precast Concrete Rebar Positions Using Colored Laser Scan Data[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(9): 787-802.
- [9] KIM M K, THEDJA J P P, WANG Q. Automated Dimensional Quality Assessment for Formwork and Rebar of Reinforced Concrete Components Using 3D Point Cloud Data[J]. Automation in Construction, 2020, 112: 103077.
- [10] 混凝土结构工程施工质量验收规范: GB 50204—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Code for Quality Acceptance of Concrete Structure Construction: GB 50204—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [11] RADU B R, STEVE C. Downsampling a Pointcloud Using a Voxelgrid Filter[EB/OL]. [2021-03-25]. [https://pointclouds.org/documentation/tutorials/voxel\\_grid.html](https://pointclouds.org/documentation/tutorials/voxel_grid.html).
- [12] KIM C, SON H, KIM C. Automated Construction Progress Measurement Using a 4D Building Information Model and 3D Data[J]. Automation in Construction, 2013, 31: 75-82.
- [13] Anon. Principal Component Analysis[EB/OL]. [2021-03-25]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Principal\\_component\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Principal_component_analysis).
- [14] JAADI Z. A Step-by-step Explanation of Principle Component Analysis[EB/OL]. [2021-03-25]. <https://builtin.com/data-science/step-step-explanation-principal-component-analysis>.
- [15] Anon. Random Sample Consensus[EB/OL]. [2021-04-28]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Random\\_sample\\_consensus](https://en.wikipedia.org/wiki/Random_sample_consensus).
- [16] 装配式混凝土结构表示方法及示例(剪力墙结构): 15G107-1[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- Representation Method and Example of Fabricated Concrete Structure (Shear Wall Structure): 15G107-1[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.