

基于机器视觉的混凝土自动振捣系统研究

冉子璇 王信 宋文腾 李嘉伟

(长安大学工程机械学院 陕西 西安 710000)

摘要:为解决现阶段以人工的劳动形式进行混凝土振捣的低效问题,本文提出了一种由机器视觉控制机械臂的方法,通过深度相机的标定结果,将相机所得点云进行可视化,然后利用直通滤波器去噪算法删除噪点,使得抓取的点云精度更高且分布均匀;接着分析机械臂相关的正逆运动学模型,通过程序将相机所处理的网口坐标数据输出至机械臂坐标系下,二者配合完成振捣工作。最终经过优化,振捣棒插入网口的成功率达到 92%,实验结果表明这种方法是可行的。

关键词: 机器视觉; 网眼识别; 张正友标定; 手眼标定

0 引言

混凝土是现代基础工程建设过程中十分重要的部分,已成为现代建筑结构的主要材料,而目前混凝土振捣施工主要采用插入式振捣棒、附着式振捣器等,以人工操作为主,会出现气泡、蜂窝等现象,影响其强度与耐久性。振捣质量受操作工人的技术经验和质量观念影响较大,当下尚无科学有效的控制技术^[1]。传统的混凝土振捣主要为施工人员通过手持振捣棒对每个网口逐一振捣,振捣效率低、成本高、精度差;而采用大型振捣机械,在生产效率方面有较大幅度的提升,但成本过高。传统的振捣方式已不能满足目前的工程需求,因此必须采用新的技术使混凝土振捣更高效、成本更低以满足生产需求。通过对混凝土振捣的调研,发现将机械视觉技术应用于混凝土的自动振捣中完全可行,可通过深度相机采集振捣孔的具体数据,再通过图像处理技术实现对混凝土所需振捣网眼的识别,得到特征点的精确坐标并发送给与振捣棒相结合的机器人即可实现自动化振捣工作。相对于传统的人工振捣,视觉系统的参与可以达到提高工程效率、降低人工成本的目的^[2]。

1 系统的搭建

本文搭建的混凝土自动振捣系统,硬件为 Intel RealSense D435 深度相机,一根长 20cm、直径为 1cm 的金属棒(模拟振捣棒)以及 LeArm 机械臂,搭建的系统如图 1 所示。

2 视觉系统的设计与预处理

2.1 相机标定

确定空间网孔的坐标位置与其在图像中对应点之

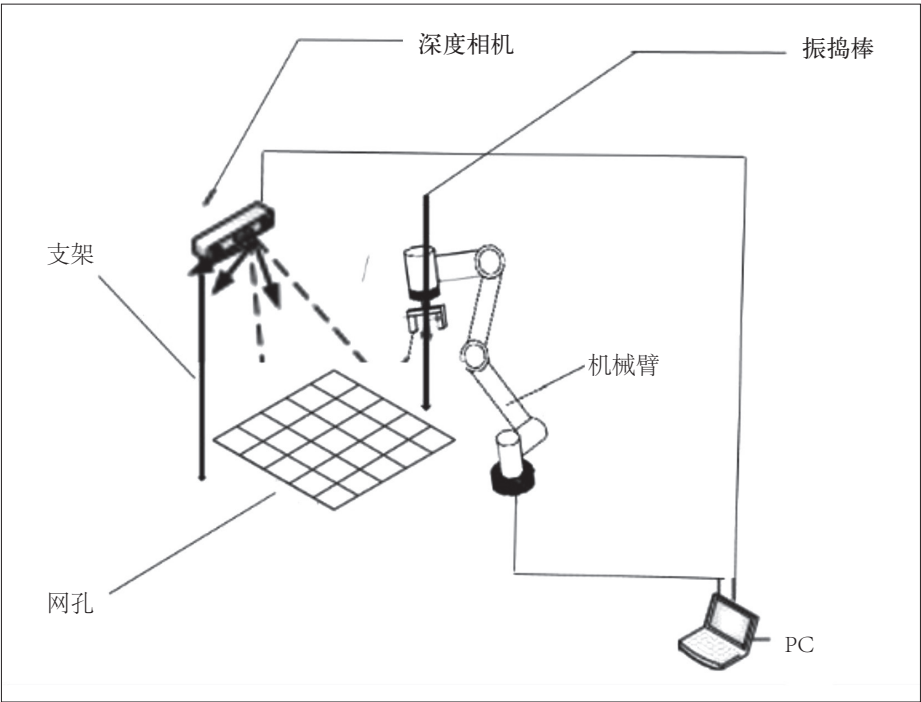


图 1 自动振捣系统的硬件图

间的关系,需通过一定的映射关系,其中涉及世界坐标系、相机坐标系、图像物理坐标系和图像像素坐标系^[3]。

首先设 (x_1, y_1, z_1) 为任何可见点 P 在世界坐标系中的坐标,设 (x_2, y_2, z_2) 为 P 在相机坐标系中的坐标,设摄像头光学中心为相机坐标系原点,即两点在坐标系平面上是重合的, z_2 轴与进光方向一致。则世界坐标系与相机坐标系之间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + K, P = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: K —确定摄像头位置的平移向量;

P —确定摄像头方向的旋转矩阵。

在图像平面中定义图像坐标系 $(o-xy)$,其中 o 表示图像平面的主点,即图像平面与光轴的交点,

其不一定与图像平面的几何中心重合。假设与 (x_2, y_2) 平面平行并且到原点的距离为 d (d 为有效相机焦距)。点 P 图像平面坐标 (x, y) 计算如下:

$$x = d \frac{x_2}{z_2}, y = d \frac{y_2}{z_2} \quad (2)$$

结合式(1)和式(2)可得出:

$$\begin{aligned} d \frac{x_2}{z_2} &= d \frac{r_{11} + r_{12}y_1 + r_{13}z_1 + k_1}{r_{31} + r_{32}y_1 + r_{33}z_1 + k_3} \\ d \frac{y_2}{z_2} &= d \frac{r_{21} + r_{22}y_1 + r_{23}z_1 + k_2}{r_{31} + r_{32}y_1 + r_{33}z_1 + k_3} \end{aligned} \quad (3)$$

设像素主点的位置由 (s_0, t_0) 确定,用 (s, t) 表示所需点的位置,阵列中的行、列数由 (s, t) 确定, x_2 轴和 y_2 轴分别平行于行方向和列方向。所需点的位置与图像平面坐标的关系如下:

$$s - s_0 = M_x x, t - t_0 = M_y y \quad (4)$$

式中: M_x 、 M_y —横、纵向单位长度的像素数。

相机标定结果与相机误差评估分别如图2、图3所示。

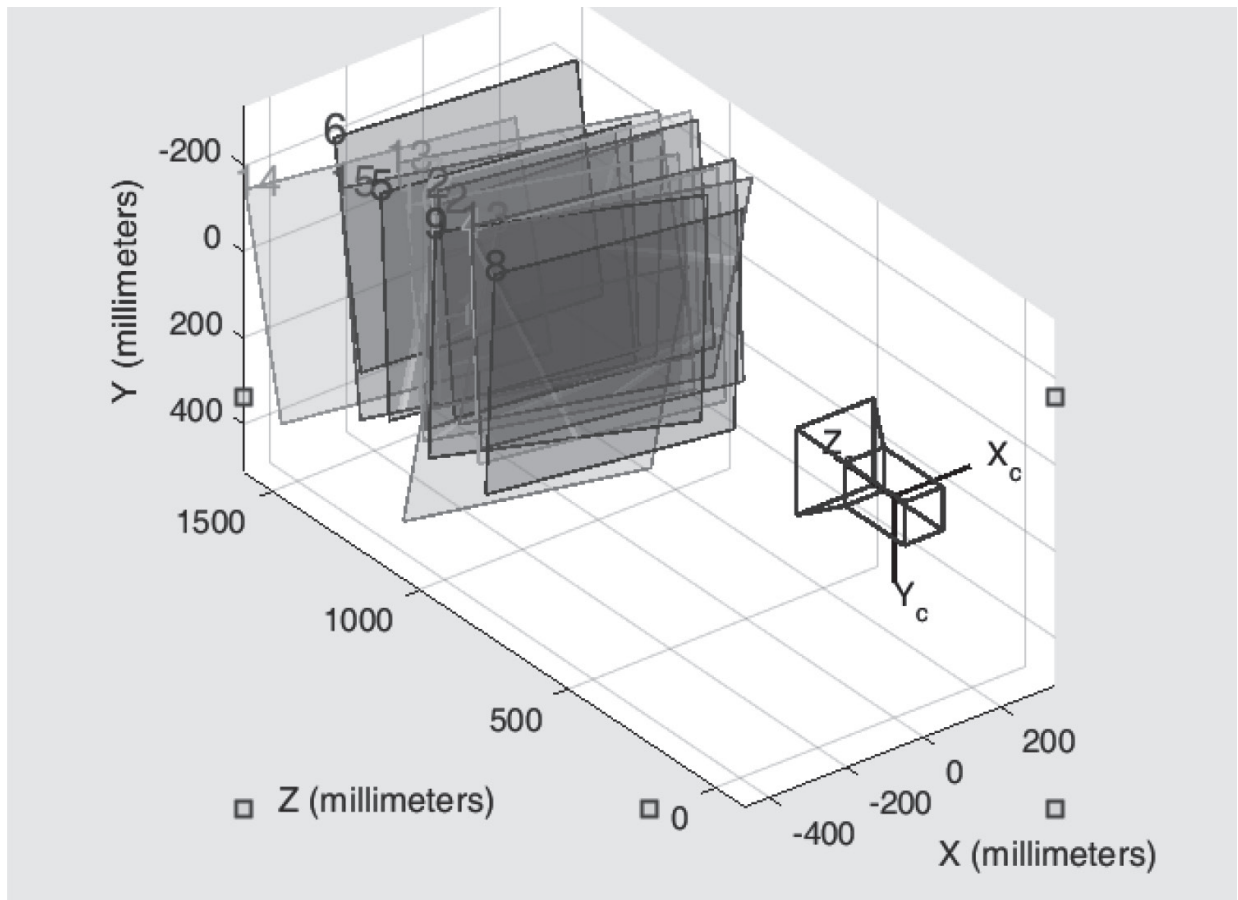


图2 深度相机标定结果

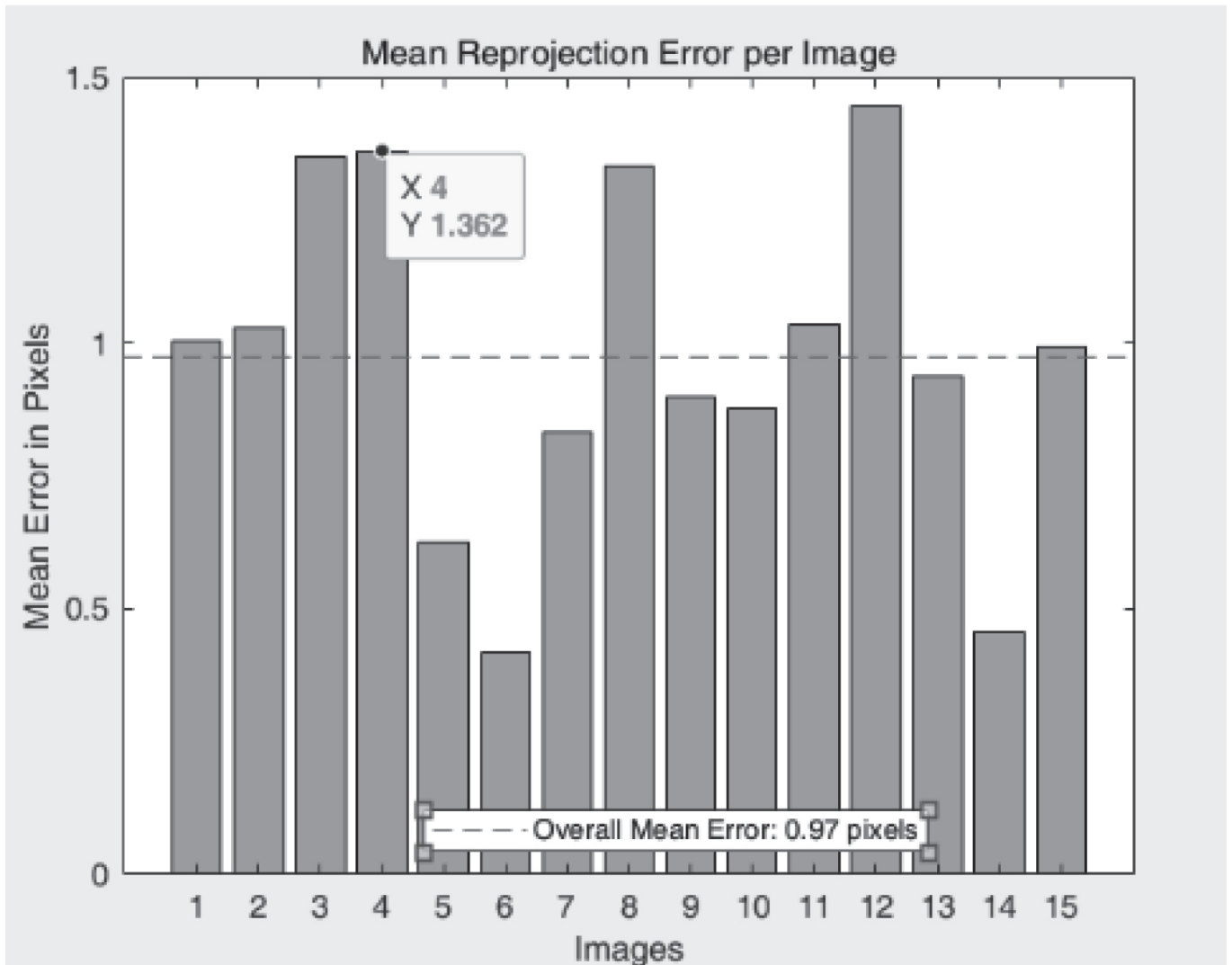


图 3 相机的误差

2.2 张正友标定法

2.2.1 摄像机畸变模型 (OpenCV)

畸变是相机的一种固有特性, 与其内参相同, 标定一次即可。对于径向畸变, 其光学中心畸变为零, 向成像边缘移动时, 畸变越来越严重。可以通过泰勒级数展开式对其进行校正:

$$X_{\text{corrected}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (5)$$

$$Y_{\text{corrected}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$$

对于切向畸变, 可以通过公式 (6) 进行校正:

$$\begin{aligned} X_{\text{corrected}} &= x[2h_1 y + h_2(r^2 + 2x^2)] \\ Y_{\text{corrected}} &= y[2h_2 y + h_1(r^2 + 2y^2)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: (x, y) — 畸变后的位置坐标;

$X_{\text{corrected}}, Y_{\text{corrected}}$ — 通过校正得到的真实坐标;

r — 点与成像中心的距离。

由以上两种畸变模型可得到 OpenCV 畸变模型:

$$\begin{aligned} X_c &= x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2h_1 x_d y_d + h_2(r^2 + 2x_d^2) \\ Y_c &= y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2h_2 x_d y_d + h_1(r^2 + 2y_d^2) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: (x_d, y_d) — 图像中存在畸变的点的位置坐标;

(X_c, Y_c) — 经过畸变校正的点的位置坐标。

由以上公式可知畸变中有 k_1, k_2, k_3, h_1, h_2 五个参数, 切向畸变与径向畸变系数 k_3 可忽略, 计算 k_1, k_2 即可, 张正友标定法中的 h_1, h_2 便默认为零。

2.2.2 张正友标定法 (只考虑径向畸变, 不考虑切向畸变)

由以上的坐标转换可知:

$$S \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

设 L 为单应性矩阵, 且 $L = A[r_1, r_2, t]$, 则

$$S \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

L 是一 3×3 矩阵, 整体有 8 个未知元素, 一组坐标对应两个方程, 则至少有四组对应的点坐标才可算出单应性矩阵 L 。

由于 R 旋转矩阵为正交矩阵, 则存在:

$$r_1^T r_2 = 0, r_1^T r_1 = r_2^T r_2 = 1 \quad (10)$$

将其代入矩阵 L 便可求得两组 A 和 L 的公式:

$$l_1^T A^{-T} A^{-1} l_2 = 0, l_1^T A^{-T} A^{-1} l_1 = l_2^T A^{-T} A^{-1} l_2 \quad (11)$$

由矩阵 A 可计算出相应的外参矩阵, 应用最小二乘法估计实际存在的径向畸变的畸变系数 (忽略切向畸变), 通过极大似然法进行优化, 得到精度较高的解^[4,5]。

2.3 点云预处理

2.3.1 点云获取

对待处理网格进行垂直方向拍摄, 得到其色彩信息、顶点坐标和深度信息, 将视频流转化为 Python 的 numpy 格式, 并通过 OpenCV 输出, 使用 scipy 保存图片, 同时得到相机参数。在 PCL 中转化得到点云 x 、 y 、 z 、 rgb 四个参数, PCL 点云通

过 showCloud 函数传递给查看器, 并得到可视化点云图。

2.3.2 点云滤波降噪

尽管 D435 相机对传感器的噪声有自动抑制功能, 但由于外界光源等客观因素的影响, 所得的点云图仍存在噪声, 所以需要点对点云图进行滤波降噪处理。

根据点云属性, 在点的属性上设置范围, 设置直通滤波器对点进行滤波, 保留范围内 (或范围外) 的点。首先指定一个维度及此维度下的值域, 遍历点云中的每一个点, 同时判断该点在指定维度上的取值是否在指定值域内, 并删除取值在值域外的点, 遍历结束后所剩下的点便构成滤波后的点云。该方法应用广泛, 且在点云的筛选方面更加彻底, 提高了其精度与辨识度。总体效果如图 4 所示。

3 机械臂的预处理

3.1 机械臂抓取控制

机械臂使用幻尔 LeArm 机械臂, 结构较普通机械臂有所优化。机身采用 6 个高精度数字舵机 (包含 3 个防烧防堵转的舵机)。机械臂的移动控制采用开环控制, 流程如图 5 所示^[6,7]。

3.2 机械臂与相机的手眼标定

搭建基于机器视觉的机械臂平台, 选择手眼标定方法进行分析, 保证相机坐标系下识别物坐标可准确转换至机械臂坐标系下^[8]。

6DOF 机械臂理论上范围内位姿的全解, 对其建立 D-H 模型, 用矩阵进行求解^[9]。D-H 模型如下:

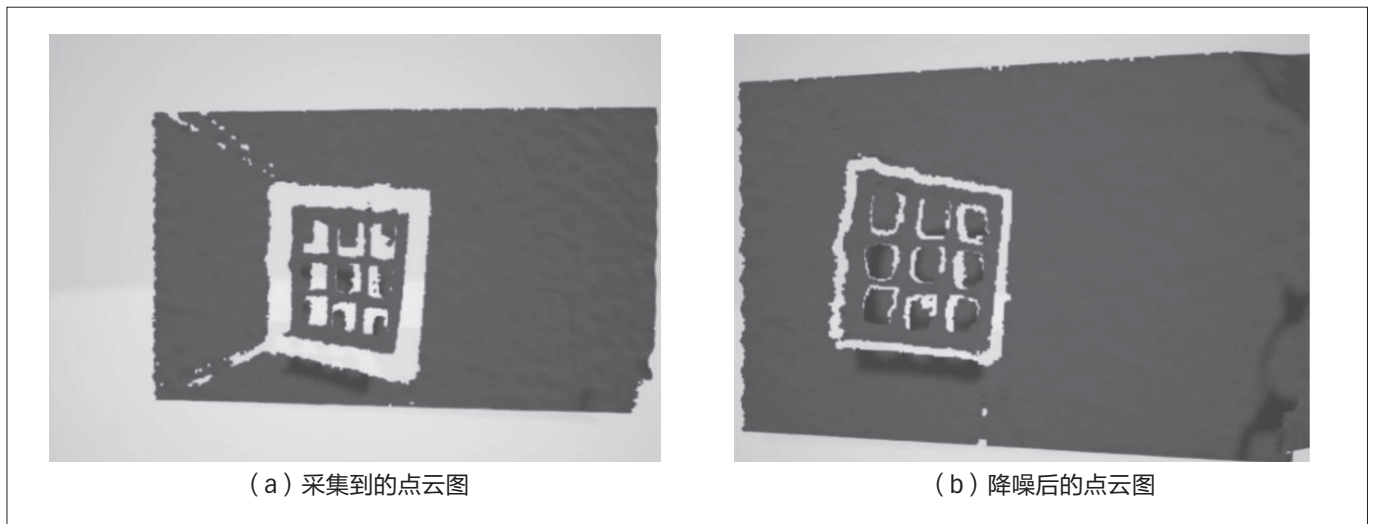
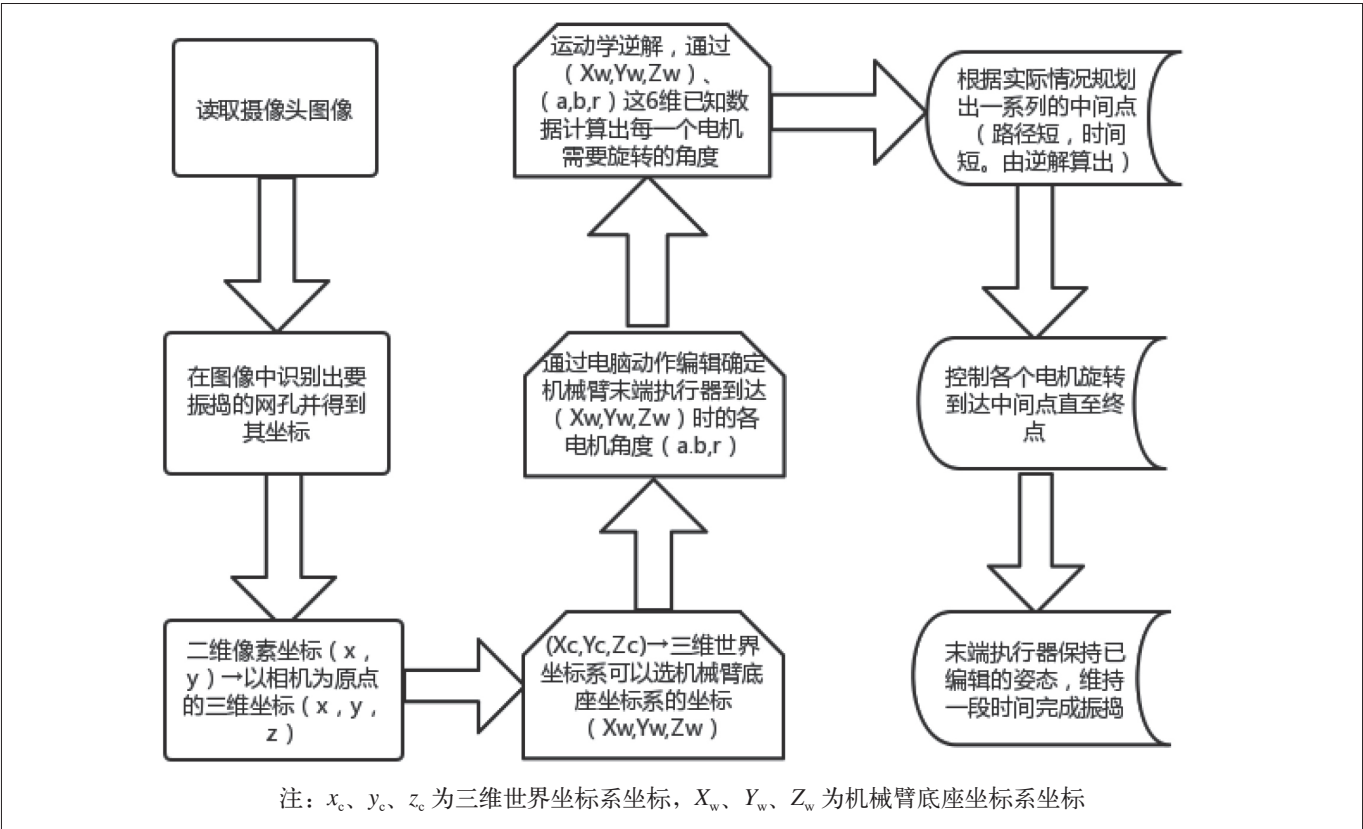


图 4 预处理后的点云图



$$\begin{matrix} \text{End}T \cdot \text{Robot1}T \cdot \text{Camera1}T \cdot \text{Object}T = \text{End}T \cdot \text{Robot2}T \cdot \text{Camera2}T \cdot \text{Object}T & (12) \\ \underbrace{\text{End}T \cdot \text{Robot2}T}_{A} \cdot \underbrace{\text{End}T \cdot \text{Robot1}T}_{X} \cdot \underbrace{\text{Camera1}T}_{X} = \underbrace{\text{Robot2}T}_{X} \cdot \underbrace{\text{Camera2}T}_{B} \cdot \underbrace{\text{Object}T}_{B} \end{matrix}$$

输入为电动机旋转的角度 $j_1, j_2, \dots, j_n$ ，输出为执行器位置 (x, y, z) 与姿态 (α, β, γ) ，如下：

$$\begin{aligned} x &= f_1(j_1, j_2, \dots, j_n) \\ y &= f_2(j_1, j_2, \dots, j_n) \\ z &= f_3(j_1, j_2, \dots, j_n) \\ \alpha &= f_4(j_1, j_2, \dots, j_n) \\ \beta &= f_5(j_1, j_2, \dots, j_n) \\ \gamma &= f_6(j_1, j_2, \dots, j_n) \end{aligned} \quad (13)$$

若欲由位姿 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 求出 $j_1, j_2, \dots, j_n$ ，需控制每个电动机分别转动 $j_1, j_2, \dots, j_n$ 到达此位姿。

4 结果与分析

4.1 手眼标定的定位精度实验与分析

移动机械臂依次到达 6 个不同位姿，使振捣棒

到达网孔中心，采集相机视野内的图像，记录每次运动过程中夹爪在基坐标系下的位姿。将相机坐标系下网孔的坐标转化到机械臂基坐标系下，并与真实值进行比对分析。不同位姿下通过相机获得的机械臂基坐标系下的坐标与真实值之间误差的平均值，如表 1 所示。

表 1 机械臂视觉定位误差精度

运动变化量	误差平均值	单位
X	2.005697	mm
Y	1.998754	mm
Z	2.065794	mm

4.2 机械臂插入网孔验证

最后振捣棒成功插入网孔的结果如下：成功次数/实验次数为 46/50，振捣棒插入网孔的成功率达到了 92%。

5 结语

本文搭建了一套基于机器视觉的机械臂自动控制振捣棒的系统，通过图像分析实现机械臂控制振捣棒工作，代替人工工作。为了准确地识别出网孔，采用（下转第 23 页）

系统与工作机构共用液压泵,不采用充液阀,通过驾驶员操纵多路阀进行溢流动作给制动系统补充压力油,通过设置安装在多路阀测压口的单向阀,防止多路阀在低压区间工作时,液压油流回多路阀系统,导致制动系统的压力降低;

(3) 将压力油的数值通过测压管道连接压力表,显示在驾驶员的操作面板,用于及时观察液压系统的压力值,同时设置的压力报警开关,防止因为压力过低出现车辆制动器工作的情况下车辆行驶,对驱动系统和制动器产生不可逆的损坏;

(4) 前桥制动器和后桥制动器采用单独蓄能器进行补液保压操作,安装的单向阀,防止出现压力油的回流现象,减少液压系统因为内漏而造成的制动系统的压力降低,同时两路分别控制,系统更加的稳定,同时在两个蓄能器的上级增设一个蓄能器,作为一个储能装置,增加制动次数,方便平衡前后驱动桥内制动压力,保持压力的稳定。

3 此方案优点

铲运机的制动系统压力源来自多路阀的测压油口,通过单向阀连接串联调节式全液压动力制动阀,前后驱动桥的制动器分别与串联调节式全液压动力制动阀,将充液阀从制动系统拆除掉,防止因为充液阀阀芯卡滞现象,导致制动系统故障的问题,能够避免充液阀损坏而频繁更换的问题;本方案在实现安全制动的前提下,能够大大降低生产运行和检修成本,结构简单,

设计合理,性能优越,具有较强的实用性。

4 结语

试验证明,铲运机采用多路阀给制动系统提供压力源的方案解决了铲运机使用过程中因为充液阀易坏和频繁更换的问题,同时符合相关标准的要求。该系统的成功应用,完全满足了井下安全高效的正常生产需求,具有重要的推广价值和实际意义。

参考文献:

- [1] 仇博. 矿用防爆车辆主动冷却式驱动桥冷却装置的研究 [J]. 煤矿机械, 2021, 42 (09): 61-64.
- [2] 于淼, 石博强. 液压制动系统中蓄能器的优化设计与稳健分析 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (06): 132-136.
- [3] 张鹏. 工程车辆全液压联合制动系统特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016: 20-34.
- [4] 张栋林. 地下铲运机 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 290-294.
- [5] 高梦熊. 地下装载机 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 253-259.
- [6] 全国矿山机械标准化技术委员会 (SAC/TC 88). 地下铲运机安全要求: GB 25518-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

作者简介: 傅挺 (1988.09-), 男, 汉族, 山东淄博人, 本科, 工程师, 研究方向: 机械设计。

(上接第 18 页)

深度相机规避了人眼判定导致的偶然误差, 满足建筑工作的高强度要求, 在振捣环节中有效减少人工的投入, 从而降低生产成本, 避免出现人工造成的社会问题, 工程效率显著提高, 有效保障了施工质量。

参考文献:

- [1] 康建宇, 李楠. 论混凝土振捣工艺 [J]. 建设科技, 2015 (22): 109.
- [2] 范静. 关于混凝土振动器的探索和研究 [J]. 建材技术与应用, 2005 (06): 45-46.
- [3] 田苗, 郝向阳, 刘松林, 等. 基于点离散度的张正友标定法 [J]. 全球定位系统, 2015, 40 (06): 86-88+98.
- [4] 单宝华, 霍晓洋, 刘洋. 张正友标定法在 DIC 位移测量

中的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2016, 35 (02): 8-12+21.

- [5] 李东. 机器视觉系统的优化软件设计与实现 [J]. 电子制作, 2020 (14): 11-12.
- [6] 洪诚康, 杨力, 江文松, 等. 基于多深度相机融合的机械臂抓取系统 [J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-18 [2022-06-03]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD65zPhUaeS--arx1UGdBxYIiYt2nV0o7gracIn5YqbI3eViSFdaFS8rP&uniplatform=NZKPT>.
- [7] 杨冬. 基于特征点的目标位姿估计与机械臂抓取控制 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [8] 李纪庆. 基于视觉的机械臂智能抓取系统研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [9] 王勇, 陈荟西. 基于机器视觉与单片机结合的机械臂抓取系统 [J]. 自动化技术与应用, 2021, 40 (01): 78-84.