

## 基于多源点云与图像数据的车辆定位与再识别方法

汪威<sup>1\*</sup>, 吕斌<sup>1</sup>, 杨轶睿<sup>1</sup>, 胡新宇<sup>1</sup>, 黄玉春<sup>2</sup>, 叶仲韬<sup>3,4</sup>, 王鸣辉<sup>3</sup><sup>1</sup>湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068;<sup>2</sup>武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430072;<sup>3</sup>中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034;<sup>4</sup>桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 湖北 武汉 430034

**摘要** 针对大型桥梁车辆移动荷载监测场合中车辆的重心估计能力不足和车辆再识别困难等问题, 提出一种基于点云灰度图的彩色图像与点云快速融合方法, 以提高对车辆的空间定位能力和对目标的辨识能力。首先利用立体标定靶对不同视角相机和点云采集装置的位姿进行标定, 获取它们彼此间的相对位置和姿态; 然后利用标定的结果对不同视角采集到的点云进行拼接, 得到完整的车辆点云; 再将完整点云转换至彩色相机坐标系并投影, 提取点云灰度图, 实现彩色图像与点云灰度图的配准, 将其姿态调整至与车辆实体在彩色相机坐标系内的位置和姿态一致。进一步建立彩色像素点与三维点云间的映射关系, 并将颜色信息与点云相关联, 从而实现彩色图像与点云的融合。利用融合后的彩色点云和相机成像模型, 可以得到车辆在彩色相机坐标系中的虚拟图像, 为车辆的再识别提供依据。结果显示, 相比于采样一致性算法, 所提配准算法缩短了约 74.1% 的耗时。实验表明, 所提算法实现数据融合后生成的彩色点云具有较高的还原度, 证明了所提算法的可行性, 为解决类似的问题提供了新的思路和方法。

**关键词** 激光点云; 多源数据融合; 立体标定靶; 点云灰度图; 虚拟图像; 点云着色

中图分类号 TP391.9; TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220660

## Vehicle Location and Reidentification Using Multisource Point Clouds and Images

Wang Wei<sup>1\*</sup>, Lü Bin<sup>1</sup>, Yang Yirui<sup>1</sup>, Hu Xinyu<sup>1</sup>, Huang Yuchun<sup>2</sup>, Ye Zhongtao<sup>3,4</sup>,  
Wang Minghui<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China;

<sup>2</sup>School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

<sup>3</sup>China Railway Bridge Science Research Institute, Ltd., Wuhan 430034, Hubei, China;

<sup>4</sup>State Key Laboratory for Health and Safety of Bridge Structures, Wuhan 430034, Hubei, China

**Abstract** To solve the problems of insufficient estimation ability for the center of gravity of a vehicle and difficulty in vehicle reidentification in large bridge vehicle moving load monitoring, a fast fusion method of color image and point cloud based on point cloud grayscale image is proposed to improve the spatial positioning ability for vehicles and recognition ability for targets. The stereo calibration target was used to calibrate the position and attitude of cameras and point cloud collection devices with different viewing angles to obtain their relative positions and attitudes. Then, the calibration results to splice the point clouds collected from different perspectives were used to obtain a complete vehicle point cloud. The complete point cloud was converted to the color camera coordinate system and projected, extracting the point cloud grayscale image and realizing the registration of the color image and point cloud grayscale image. We adjusted the attitude to be consistent with the position and attitude of the vehicle entity in the color camera coordinate system. The mapping relationship between color pixels and 3D point cloud was established. The color information was associated with the point cloud to fuse the color images and point clouds. Using the fused color point cloud and camera imaging model, the virtual image of the vehicle in the color camera coordinate system can be obtained, providing a basis for vehicle recognition. The results demonstrate that compared with the sampling consistency algorithm, the proposed registration algorithm requires

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-02-07; 录用日期: 2022-02-16; 网络首发日期: 2022-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(61976083)

通信作者: \*wangw@hbut.edu.cn

approximately 74.1% less time. Experiments reveal that the color point cloud generated by the proposed algorithm after data fusion has a high degree of restoration, proving the feasibility of the proposed algorithm. The proposed algorithm provides new ideas and methods for solving similar problems.

**Key words** laser point cloud; multi-source data fusion; stereo calibration target; grayscale point cloud image; virtual image; point cloud coloring

## 1 引言

桥面通行的车辆是桥梁移动荷载的主要来源。利用动态称重系统(WIM)<sup>[1]</sup>和视觉多目标跟踪技术<sup>[2]</sup>实现大型桥梁移动荷载监测<sup>[3]</sup>是近年来学术界一个新的研究方向,目前虽然已经取得了一些阶段性成果<sup>[4-5]</sup>,但基于二维图像的车辆跟踪方法对车辆的重心估计和再识别仍存在困难。所谓的再识别问题是指车辆在被遮挡后又重新出现在视野中时,系统对车辆被遮挡前后身份(ID)的维持问题。同济大学的Dan等<sup>[6]</sup>采用双目检测模型(dual-target detection model)和基于YOLO-V3的卷积神经网络改善了车辆识别能力和重心估计能力,但所给结构化的三维模型与车辆实际的三维结构还存在一定差距,对车辆再识别的重心估计数据关联方面也未有明显改善。许多车辆,特别是大型车辆,由于视角的改变、被遮挡前后的形态和颜色特征差异较大,难以通过二维图像特征将其关联在一起。本文试图借助近年来迅猛发展的点云技术和虚拟现实技术<sup>[7]</sup>改善这些问题。

激光点云数据具有采集便捷、分布均匀、对光照不敏感、精度统一、覆盖范围大、人为误差小等优点,但缺少颜色信息和纹理信息,可判读性较差,提取特征信息的方法尚不够成熟。而二维彩色图像与三维点云具有很强的互补性,特别是所具有的颜色信息和纹理信息能为三维点云数据的有效利用带来显著的帮助。因此,近年来关于三维点云与彩色图像融合的研究成为本领域的热点之一<sup>[8-10]</sup>。

同一对象的三维点云与二维图像信息之间存在特定的映射关系<sup>[11]</sup>,配准是对多源化数据进行综合利用的前提条件。精确标定出二者之间的对应参数是实现信息融合和场景重建的基础<sup>[12-13]</sup>。

目前国内外常用的点云与图像配准融合算法分为两种。第一类是手动匹配法:该方法由美国的Scaramuzza等<sup>[14]</sup>首次提出,通过人工选取目标场景中有限个相对应的三维激光点与视觉像素点,利用这些匹配的特征点对标定出点云扫描仪与相机的相对位姿;Habib等<sup>[15]</sup>手动提取点云与图像中对应的直线特征,依据特征坐标求解相机参数,进而实现扫描仪与相机的联合标定,但该类方法会引入较大的人为误差,自动化程度低,花费较多时间。第二类是特制标定板匹配法:García-Moreno等<sup>[16]</sup>采用带有棱形孔洞特质标定板作为工具,利用位置关系相对确定的激光三维扫描

装置和相机获取多组对应的三维激光特征点和像素特征点配准,标定出激光雷达和相机的映射关系,Klimentjew等<sup>[17]</sup>提取黑白格标定板特征角点像素坐标,并对其与三维激光提取的特征角点进行匹配,计算出激光与相机之间的参数,这两种方法的缺点是标靶的扫描效果对匹配点的提取精度影响较大,只有在距离近和偏转角较小的情况下才能保证良好的效果;Rushmeier等<sup>[18]</sup>采用表面带有特殊纹理的三面体标定系统,该系统精度依赖于纹理模糊度,且每次只能进行单视野标定;沙欧等<sup>[19]</sup>利用带中心圆的环形编码标志点标定彩色相机与三维激光扫描设备的相对位姿,该方法依据目标几何特性需要粘贴足够多的标志点,但环形编码标志点的三维点云特征提取不易且标志点会造成对应位置点云数据缺失,影响模型完整性。

点云采集装置在直线特征和平面特征缺乏的条件下难以找到特征点对,因此国内外大多数研究只能在实验室或者特定环境下进行,这些方法达不到点云与图像在室外环境下精确匹配的要求。另外,大多研究都是对单一视角所采集到的点云和图像进行融合和三维重建的,对多视角采集到的数据进行配准与融合的研究较少。

综上所述,针对多目标视觉跟踪方法在桥梁车辆荷载动态监测过程中对车辆的重心估计和再识别问题,本文提出一种多源性点云与彩色图像融合方法,利用特征提取和虚拟现实等手段解决问题。

## 2 桥梁车辆荷载动态监测系统及工作流程

桥梁车辆荷载动态监测系统的主要功能是准确监测车辆在桥面通行过程中对桥面所形成的荷载动态分布情况。系统的总体结构如图1所示,当车辆上桥前,首先需要通过WIM的称重区,车道外侧路灯杆上每间

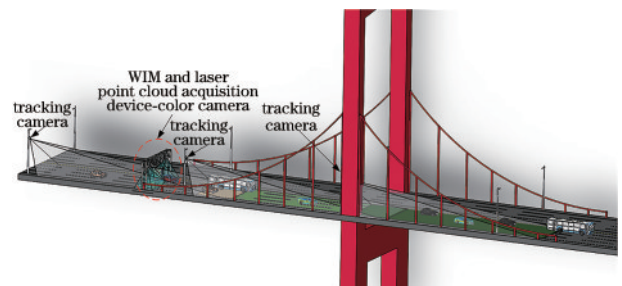


图1 基于WIM和多相机的桥梁移动荷载监测系统  
Fig.1 Monitoring system for bridge's moving load based on WIM and multi-cameras

隔一定距离架设一只彩色跟踪相机,相机朝向车辆驶离方向,相邻相机的视野范围具有一段重叠区域。其中,第 1 只跟踪相机架设于 WIM 的侧后方,主要作用是当检测到车辆通过称重区域时,WIM 同时采集该车辆的重量信息、点云数据和彩色图像信息,将信息融合并给该车辆分配一个唯一的身份(ID)。车辆通过整个桥梁路面时,将依次不间断通过道侧架设的相机。系统通过全程跟踪车辆在桥梁上的行驶轨迹,对先前采集到的重量信息与 ID 进行绑定,实现对全桥车辆荷载的动态监测。

系统工作流程如图 2 所示,利用立体标定靶标定

出各彩色相机内外参数和点云采集装置相对位姿,将各局部点云拼接成完整点云,建立点云采集装置到相机坐标系的映射模型,完成点云与彩色图像的配准,实现数据融合。利用跟踪相机识别车辆位置,生成目标车辆 2D 包围框,进而根据相机外部参数实现车辆粗定位,同时将前期生成的彩色点云转换至相机坐标系下进行虚拟成像,通过特征提取对虚拟图像与目标车辆图像进行相似度估计,进行微分平移与旋转直到两者相似度大于阈值,此时彩色点云中心即为相应目标车辆的重心位置。同时虚拟图像可用于对目标车辆的再识别。

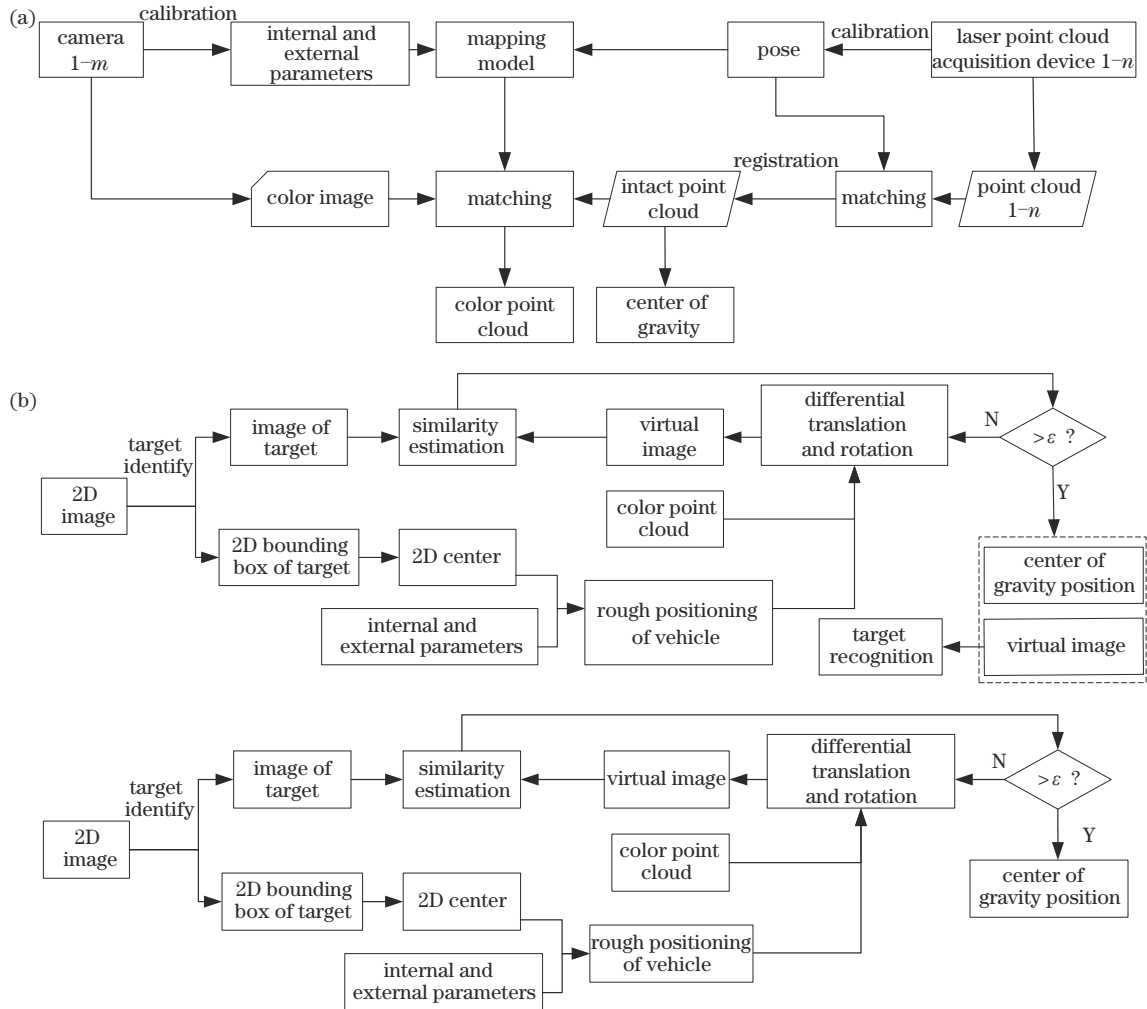


图 2 车辆 RGB-D 数据的生成与应用。(a) 3D 点云与彩色图像配准;(b) 利用 RGB-D 数据进行重心估计和虚拟场景生成  
Fig. 2 Generation and application of vehicle RGB-D data. (a) Registration of 3D point cloud and RGB camera; (b) center of gravity estimation and virtual scene generation by using RGB-D data

在 WIM 上方空间环绕布置有多个点云采集装置和彩色相机,同时从不同位置和视角采集车辆点云数据和彩色图像,如图 3 所示。

### 3 点云与图像采集装置的位姿标定

采用多个点云采集装置和多个彩色相机从不同视角采集原始数据,为生成车辆的彩色点云,需对这些数

据采集装置进行标定。为确定多个点云采集装置和多个彩色相机之间的相对位姿,对采集到的多源数据之间进行配准、拼接与融合。设计如图 4 所示边长为  $2L$  的正六面体标定靶,除底面外,其他 5 个表面均印有颜色棋盘格。标定靶由专用小车承载,设其距地面高度为  $h$ 。以处于称重系统感应线圈正上方的标定靶重心为坐标原点,建立笛卡儿坐标系  $O_w - X_w Y_w Z_w$ 。

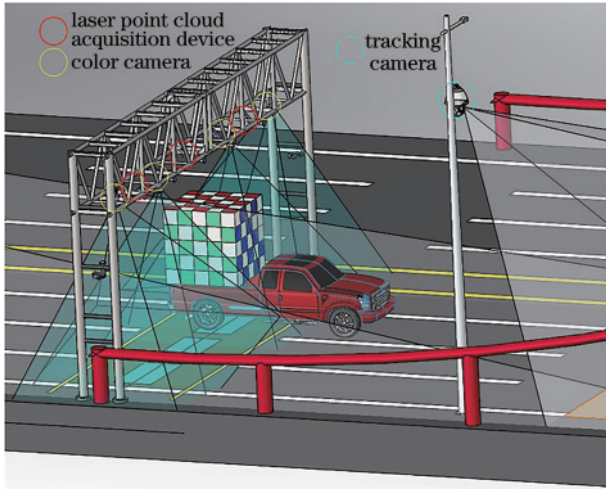


图 3 WIM 上方的点云与图像采集装置

Fig. 3 Point cloud and image acquisition devices over the WIM

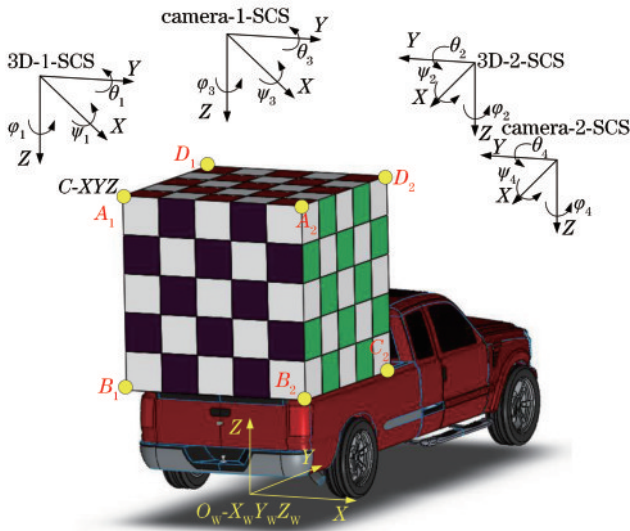


图 4 点云与图像采集装置的标定

Fig. 4 Calibration of point cloud and image acquisition devices

### 3.1 多个点云采集装置的标定

点云采集装置坐标系到世界坐标系的转换关系表示为

$${}^{S_i}P_i = {}^{S_i}M_w {}^wP_i, \quad (1)$$

式中:世界坐标系到点云采集装置  $S_i$  的转换矩阵

$${}^{S_i}M_w = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, I=1, 2, 3, 4; {}^{S_i}P_i \text{ 表示点云}$$

采集装置  $S_i$  坐标系中点的坐标;  ${}^wP_i$  表示立体标定靶顶点  $P_i$  在世界坐标系下的坐标。

容易保证点云采集装置在扫描标定靶时能够同时覆盖其中的 3 个正交面,首先从点云中随机抽取  $n$  组不共线三点,并计算每组三点所在平面的单位法向量,从而得到  $n$  个单位向量。对这  $n$  个单位向量进行聚类,密度最大的三个簇心即为 3 个正交面的单位法向量,结

合已知的标靶几何尺寸,可以获取标靶在该点云采集装置坐标中的 8 个顶点的坐标,设为  ${}^{S_i}P_i = [X_i \ Y_i \ Z_i]^T$ ,其中  $I=1, 2, \dots, l, i=1, 2, \dots, 8$ 。设各顶点在世界坐标系内的坐标为  ${}^wP_i = [X_{wi} \ Y_{wi} \ Z_{wi}]^T$ ,矩阵形式为  ${}^wP = \begin{bmatrix} -L & -L & -L & -L & L & L & L & L \\ -L & -L & L & L & -L & -L & L & L \\ 2L+h & h & h & 2L+h & 2L+h & h & h & 2L+h \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ ,由

此可以得到方程:

$$\begin{cases} r_{11}X_{wi} + r_{12}Y_{wi} + r_{13}Z_{wi} + t_{14} = X_i \\ r_{21}X_{wi} + r_{22}Y_{wi} + r_{23}Z_{wi} + t_{24} = Y_i \\ r_{31}X_{wi} + r_{32}Y_{wi} + r_{33}Z_{wi} + t_{34} = Z_i \end{cases} \quad (2)$$

当所选扫描点系数矩阵  ${}^wP_i {}^wP_i^T$  满秩时,存在逆矩阵  $({}^wP_i {}^wP_i^T)^{-1}$ 。给出 8 组对应点坐标,可得到 24 组线性方程,可用最小二乘法求解式(2)中的 12 个参数。求得矩阵  ${}^{S_i}M_w$  的解为

$${}^{S_i}M_w = {}^{S_i}P_i {}^wP_i^T ({}^wP_i {}^wP_i^T)^{-1}. \quad (3)$$

将点云采集装置  $S_1$  采集的数据  ${}^{S_1}P_i$  和点云采集装置  $S_2$  采集的数据  ${}^{S_2}P_i$  分别对应代入式(3),可求得

$${}^{S_1}M_w = {}^{S_1}P_i {}^wP_i^T ({}^wP_i {}^wP_i^T)^{-1}, \quad (4)$$

$${}^{S_2}M_w = {}^{S_2}P_i {}^wP_i^T ({}^wP_i {}^wP_i^T)^{-1}. \quad (5)$$

联立式(4)和式(5),可得点云采集装置  $S_2$  坐标系到点云采集装置  $S_1$  坐标系的转换关系为

$${}^{S_1}M_{S_2} = {}^{S_1}M_w {}^wM_{S_2} = {}^{S_1}P_i {}^wP_i^T ({}^{S_2}P_i {}^wP_i^T)^{-1}. \quad (6)$$

以此类推,可根据式(6)将各局部点云数据转换至同一点云采集装置坐标系下,如扫描仪  $S_1$ ,可得在扫描仪  $S_1$  坐标系下的完整点云,记为  ${}^{S_1}P_{3D}$ 。

### 3.2 多个彩色相机的标定

#### 1) 彩色相机参数标定

确定相机像素坐标系与世界坐标系转换关系属于相机标定算法领域范围,该领域的研究比较成熟,通过颜色分割出不同表面上的棋盘格,采用 Faugeras 法<sup>[20]</sup> 标定求解相机的内外参矩阵。

设彩色相机  $J$  内参矩阵为  ${}^lM_{C_j}$ ,  $J$  相机坐标系与世界坐标系位姿刚体变换矩阵为  ${}^cM_w$ ,其中  $l_j$  表示相机  $J$  的图像坐标系,  $C_j$  表示相机  $J$  的相机坐标系,  $w$  表示世界坐标系,则相机图像坐标  $\mathbf{x}_{ics} = [u_c \ v_c \ 1]^T$  与世界坐标  $\mathbf{X}_{wcs} = [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T$  之间的对应关系可表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = {}^lM_{C_j} {}^cM_w \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\text{式中: } {}^lM_{C_j} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, {}^cM_w = \begin{bmatrix} \lambda_1^T & t_x \\ \lambda_2^T & t_y \\ \lambda_3^T & t_z \\ \mathbf{0}_3^T & 1 \end{bmatrix}, M =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_1^T & m_{14} \\ \mathbf{m}_2^T & m_{24} \\ \mathbf{m}_3^T & m_{34} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\lambda}_i^T = (\lambda_{i1} \ \lambda_{i2} \ \lambda_{i3}), \mathbf{m}_i^T = (m_{i1} \ m_{i2} \ m_{i3}),$$
 $i=1, 2, 3$ 。若标定靶上角点的图像坐标

$\mathbf{x}_{iCS} = [u_{cj} \ v_{cj} \ 1]^T$  和对应世界坐标  $\mathbf{X}_{WCS} = [X_{Wj} \ Y_{Wj} \ Z_{Wj} \ 1]^T$  已知, 代入式(7), 整理消去  $Z_C$ , 得方程组:

$$\begin{cases} m_{11}X_{Wj} + m_{12}Y_{Wj} + m_{13}Z_{Wj} + m_{14} - u_{cj}m_{31}X_{Wj} - u_{cj}m_{32}Y_{Wj} - u_{cj}m_{33}Z_{Wj} = u_{cj}m_{34} \\ m_{21}X_{Wj} + m_{22}Y_{Wj} + m_{23}Z_{Wj} + m_{24} - v_{cj}m_{31}X_{Wj} - v_{cj}m_{32}Y_{Wj} - v_{cj}m_{33}Z_{Wj} = v_{cj}m_{34} \end{cases} \quad (8)$$

取 6 组或以上角点及其对应点世界坐标, 即可利用最小二乘法求解矩阵  $\mathbf{M}$ , 再求解内外参数, 得

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{C_j} = \begin{bmatrix} m_{34}^2 |\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}_3| & 0 & m_{34}^2 \mathbf{m}_1^T \mathbf{m}_3 & 0 \\ 0 & m_{34}^2 |\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_3| & m_{34}^2 \mathbf{m}_2^T \mathbf{m}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_W = \begin{bmatrix} \frac{m_1 - m_{34}^2 \mathbf{m}_1^T \mathbf{m}_3}{m_{34} |\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}_3|} & \frac{m_{14} - m_{34}^2 \mathbf{m}_1^T \mathbf{m}_3}{m_{34} |\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}_3|} \\ \frac{m_2 - m_{34}^2 \mathbf{m}_2^T \mathbf{m}_3}{m_{34} |\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_3|} & \frac{m_{24} - m_{34}^2 \mathbf{m}_2^T \mathbf{m}_3}{m_{34} |\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_3|} \\ m_{34} \mathbf{m}_3 & m_{34} \\ \mathbf{0}_3^T & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

## 2) 跟踪相机参数标定

跟踪相机用于桥面车辆全程接力跟踪, 为了对跟踪过程中在相机视野中丢失的车辆进行重识别, 需要利用跟踪相机模型对彩色点云进行重投影, 因此需要对跟踪相机进行标定。标定过程中, 标定车承载立体标定靶在相机视野覆盖范围内沿桥面车道直线运动, 相机抓取多幅标定靶图像, 通过颜色分割出不同表面

上的棋盘格, 利用与上文类似方法进行标定, 得到跟踪相机内参矩阵为  ${}^l \mathbf{M}_{C_j}$ , 外参矩阵为  ${}^c \mathbf{M}_W$ 。

3) 点云采集装置坐标系到彩色相机坐标系转换关系  
联立式(4)和式(9), 可得点云采集装置坐标系  $S_1$  到相机坐标系  $C_j$  转换关系为

$${}^c \mathbf{M}_{S_1} = {}^c \mathbf{M}_W {}^W \mathbf{M}_{S_1} = {}^c \mathbf{M}_W {}^W \mathbf{P}_i {}^W \mathbf{P}_i^T ({}^{S_1} \mathbf{P}_i {}^W \mathbf{P}_i^T)^{-1}, \quad (J=1, 2, 3, 4).$$

## 4 基于点云灰度图的配准及车辆场景估计

为快速而准确地对三维点云与彩色二维图像进行配准, 提出一种基于点云灰度图的配准方法 (GI-PC)。首先将点云坐标系  $S_1$  下的完整点云  ${}^{S_1} \mathbf{P}_{3D}$  转换至彩色相机坐标系  $C_j$  下, 有

$${}^c \mathbf{P}_{3D} = {}^c \mathbf{M}_{S_1} {}^{S_1} \mathbf{P}_{3D}, \quad (J=1, 2, \dots, u). \quad (11)$$

利用虚拟相机将相机坐标系下点云  ${}^c \mathbf{P}_{3D}$  的点  ${}^c \mathbf{P}_{3D}(\mathbf{X})_{CCS}$  投影变换至图像坐标系下, 为点  $\mathbf{H}_{ICS}$ 。设  ${}^c \mathbf{P}_{3D}(\mathbf{X})_{CCS} = [X_C \ Y_C \ Z_C \ 1]^T$ ,  $\mathbf{H}_{ICS} = [m_J \ n_J \ 1]^T$ , 则  ${}^c \mathbf{P}_{3D}(\mathbf{X})_{CCS}$  和  $\mathbf{H}_{ICS}$  之间的转换公式为

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{ICS} = \begin{bmatrix} m_J \\ n_J \\ 1 \end{bmatrix} = s_2 {}^l \mathbf{M}_{C_j} {}^c \mathbf{P}_{3D} = s_2 {}^l \mathbf{M}_{C_j} \begin{bmatrix} X_{C_j} \\ Y_{C_j} \\ Z_{C_j} \\ 1 \end{bmatrix} \\ \text{gray}(m, n) = \text{round} \left[ 255 \times \frac{{}^c P_{3Dz} - \min({}^c P_{3Dz})}{\max({}^c P_{3Dz}) - \min({}^c P_{3Dz})} \right], \quad (J=1, 2, \dots, u), \\ m = \frac{{}^c P_{3Dx}}{s_u} \\ n = \frac{{}^c P_{3Dy}}{s_v} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $s_2$  为比例因子;  ${}^c P_{3Dx}$ 、 ${}^c P_{3Dy}$ 、 ${}^c P_{3Dz}$  分别为  ${}^c \mathbf{P}_{3D}$  中点在彩色相机坐标系内的坐标分量;  $s_u$ 、 $s_v$  分别为点云灰度图在宽度方向  $u$  和高度方向  $v$  上的量化因子, 单位为 mm/pixel;  $(m, n)$  为点云  ${}^c \mathbf{P}_{3D}$  中的点投影成点云灰度图对应的像素坐标;  $\text{gray}(m, n)$  为点云灰度图中像素  $(m, n)$  的灰度值。

### 4.1 彩色点云生成

在整个系统中, 由于三维点云采集装置与彩色相

机间相对位姿固定, 由相机成像原理可知, 此时点云  ${}^c \mathbf{P}_{3D}$  与彩色图像之间符合“物与像”的关系, 但在点云与彩色图像建立对应关系时, 常出现同一彩色值对应多个三维点的情况, 因此引入点云灰度图, 针对这一问题, 在着色过程中取离相机最近的点 (即灰度值较高对应的三维点)。

由于点云分辨率较相机低, 扫描点与图像匹配点并不是同名点, 因此需要对三维点云进行数据增补。

它们之间的对应关系由最邻近关系确定,并在迭代过程中不断修正,使得像素坐标集能最好地配准到点云 ${}^c P_{3D}$ 坐标中。根据点云采集装置数据特点,采用逐行插值的方法,插值原理如图 5 所示。待插值点的三维空间坐标的计算公式为

$$\begin{cases} X_i = X_K + \frac{X_{K+1} - X_K}{\Delta\mu} \cdot i \\ Y_i = Y_K + \frac{Y_{K+1} - Y_K}{\Delta\mu} \cdot i, \\ Z_i = Z_K + \frac{Z_{K+1} - Z_K}{\Delta\mu} \cdot i \end{cases} \quad (13)$$

式中: $i$ 表示从第 $K$ 个点到第 $K+1$ 个点之间第 $i$ 个待插值点,且 $1 \leq i \leq \Delta\mu$ ; $\Delta\mu$ 为对应坐标分量上点云与对应图像像素尺寸比值,即插值点数; $(X_K, Y_K, Z_K), (X_{K+1}, Y_{K+1}, Z_{K+1})$ 表示相邻两点坐标; $(Z_K, Y_K, Z_K)$ 表示待插值点的坐标。记彩色点云为 $P_{C-3D}$ 。

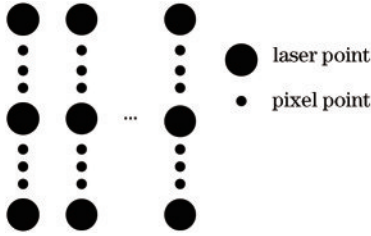


图 5 点云的插值

Fig. 5 Interpolation of point cloud

#### 4.2 结合 2D 包络框和彩色点云的车辆重心估计

已完成跟踪相机标定,再建立点云坐标系与跟踪相机坐标系转换关系式:

$${}^c_r M_{S_1} = {}^c_r M_W^W M_{S_1}, \quad (14)$$

$${}^c_r P_{3D} = {}^c_r M_{S_1} P_{C-3D}. \quad (15)$$

通过图像处理技术<sup>[21-22]</sup>,可提取跟踪相机下车辆 2D 包络框,计算 2D 中心点世界坐标系下的坐标,实现车辆位置粗定位;同时将彩色点云平移至该坐标,再将彩色点云按式(15)转换至跟踪相机坐标系下,通过相机内参投影成像,此时投影图与彩色图像还有一定差异,因此需要对点云进行进一步调整。本文采用一种基于点云投影图像的特征提取方法,将点云投影生成二维虚拟图像,将三维-二维配准问题转换为二维-二维配准问题。使用尺度不变特征变换(SIFT)算法提取特征并进行相似度估计,利用对应匹配点间的转换关系,对彩色点云 ${}^c_r P_{3D}$ 进行姿态微调,对再生成的投影图与彩色图进行特征匹配,如此迭代,直到相似度大于给定阈值,流程如图 2(b)所示。

设彩色点云投影图和彩色图像特征分别为数据集 $p_i$ 和 $p_j$ ,彩色点云投影图与彩色图像配准的目的是找到矩阵 $R$ 和 $T$ ,利用最小二乘法求解最优变换:

$$E = \arg \min_{R, T} \sum_{i=1}^N |({}^c_r P_i + T) - q_j|^2. \quad (16)$$

最终得到的点云与彩色图像姿态可认为是一致的,此时彩色点云的中心即为车辆重心。

## 5 实验与数据处理

### 5.1 实验系统搭建

实验运行环境为 Intel Core i7-7700K、PCL1.8.1 平台。为了验证所提算法的有效性,利用车辆模型进行实验,车辆模型外形尺寸长/宽/高分别为 48.0 mm/33.5 mm/37.0 mm,如图 6 所示。大恒彩色相机的型号为 MER-2000-5GC,分辨率为 5496×3672,传感器尺寸为 2.54 cm,镜头的焦距为 25 mm,能实现高质量彩色图像采集。



图 6 车辆模型

Fig. 6 Vehicle mockup

选用 KEYENCE LJ-X8200 型线激光测量仪进行点云采集,如图 7 所示,该传感器沿 X 轴的采样间距为 25  $\mu$ m,沿 Y 轴的采样间距为 26  $\mu$ m,采样速率为 1.25 m/s,相关关系为

$$z_{\text{true}} = (z_i - 32768) \times 4, \quad (17)$$

式中: $z_{\text{true}}$ 表示 $z$ 坐标真实值, $z_i$ 表示存储值,单位为 mm。

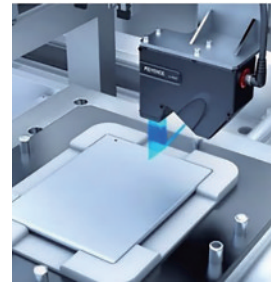


图 7 点云采集装置

Fig. 7 Point cloud acquisition device

### 5.2 实验结果与分析

跟踪相机的标定结果如下。相机内部参数:焦距 $f=23.8718$  mm,镜头光轴的像素坐标主点位置为(2714.38 pixel, 1782.45 pixel),像元大小为 $dx=2.34$   $\mu$ m和 $dy=2.4$   $\mu$ m,即得跟踪相机内参矩阵 ${}^c_r R_{C_r}$ 。相机外部参数: ${}^c_r R_W =$

$$\begin{bmatrix} 0.99976 & -0.01785 & -0.01272 & -0.02689 \\ 0.01165 & 0.92421 & -0.38169 & 0.01014 \\ 0.01857 & 0.38146 & 0.92419 & 0.41104 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为测试所提标定算法对局部点云快速配准的有效性,以小车各视角点云进行配准,其中以图 8(a)为标准点云,图 8(b)~(d)为待配准点云。配准后完整点云如图 9 所示。

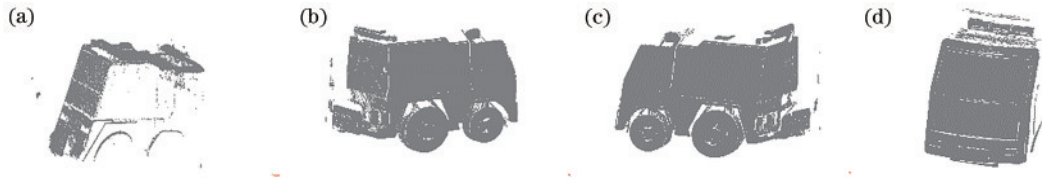


图 8 原始局部点云。(a)顶视点云;(b)右视点云;(c)左视点云;(d)前视点云

Fig. 8 Original partial point cloud. (a) Point cloud from top side; (b) point cloud from right side; (c) point cloud from left side; (d) point cloud from front side

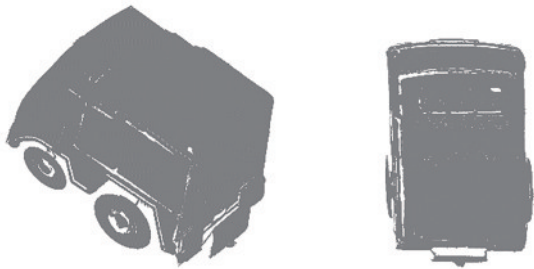


图 9 模型的完整三维点云

Fig. 9 Full 3D point cloud of the model

利用所提配准算法与工程中常用的采样一致性算法(SAC-IA)分别对图 8(b)~(d)三组点云进行配准,耗时如表 1 所示。结果表明,所提算法在耗时上比 SAC-IA 约缩短了 74.1%。所提算法耗时在 5 s 内,满足设计要求。

表 1 所提算法和 SAC-IA 的点云配准耗时

Table 1 Time consuming for point cloud registration of the proposed algorithm and SAC-IA

Method	Time consuming /s		
	Fig. 8(b)	Fig. 8(c)	Fig. 8(d)
SAC-IA	15.97	16.83	16.61
Proposed method	3.95	4.36	4.23

为验证所提算法提取标定靶各面效果,与常用的最小二乘法(LSM)作比较,法向量欧氏距离变化量  $\Delta V$  的变化趋势如图 10 所示。最小二乘法依赖于拟合

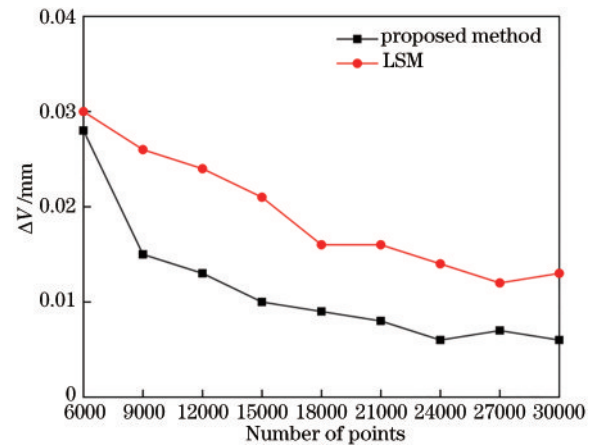


图 10 不同取样点数对法向量欧氏距离变化量的影响  
Fig. 10 Influence of different number of sampling points on variation of Euclidean distance of normal vector

面参与点的选择和数量,而所提算法提取平面时则可有效剔除无效点或噪点影响,因此精度得到有效提高。从图 10 可以看出:所提算法提取法向量的收敛速度较 LSM 更快,随着点数增加至 20000,误差收敛;且由于能够提出无效点,能明显减小法向量提取误差,因此可明显减小顶点提取误差。

利用彩色相机采集模型各视角图像数据,将完整点云分别转换至各彩色相机坐标系下并进行虚拟成像,得到点云灰度图。图 11 中,利用直线连接了彩色图像和经反色处理后的点云灰度图中相对应的关键特征点,进行姿态调整后对点云进行着色,最终得到着色

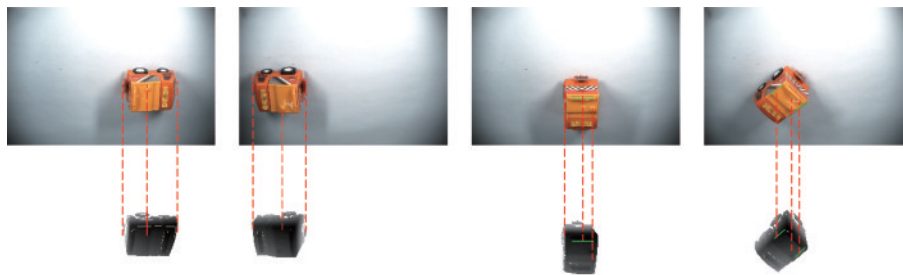


图 11 车辆模型的彩色图像和点云灰度图

Fig. 11 Color image and point cloud grayscale image of vehicle model

后的点云数据。图 12 显示了着色后的彩色点云,放大了部分图像以显示细节,在视觉效果上接近真实模型。因此所提算法可以有效地实现多源彩色图像与点云数据融合。

为了验证所提算法构建车辆模型时对车辆再识别和重心估计的作用,实验中车辆模型沿远离跟踪相机

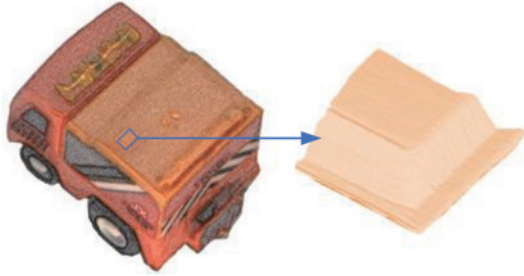


图 12 车辆模型的彩色点云网格  
Fig. 12 Colored cloud point grid of vehicle mockup

方向做直线运动,在跟踪相机对小车进行“跟踪”过程中,提取车辆 2D 包络框,调整彩色点云位置和姿态并进行虚拟成像,实验结果如图 13 所示。

对比图 13 上下两栏,上栏为彩色点云虚拟场景,下栏为彩色原现实图像。现实图像上车辆模型表面存在划痕和光照变化引起的大面积“亮斑”,而彩色点云虚拟场景图则不存在;同时可以看出两者在姿态上相似度高,说明所提算法构建车辆彩色点云数据后,在利用彩色相机跟踪车辆的过程中,若遇到光照变化等原因使车辆跟踪时 ID 维持受干扰时,能够有效辅助目标跟踪和再识别空间定位。

提取跟踪相机采集的图像的 2D 包络框中心点,如图 13 中的包络框,并记录对应姿态下彩色点云中心,将中心点坐标均转换至世界坐标下,同时记录车辆模型在世界坐标系下的真实坐标,结果如表 2 所示,并将 Y 分量(沿车前进方向)绘成图 14。

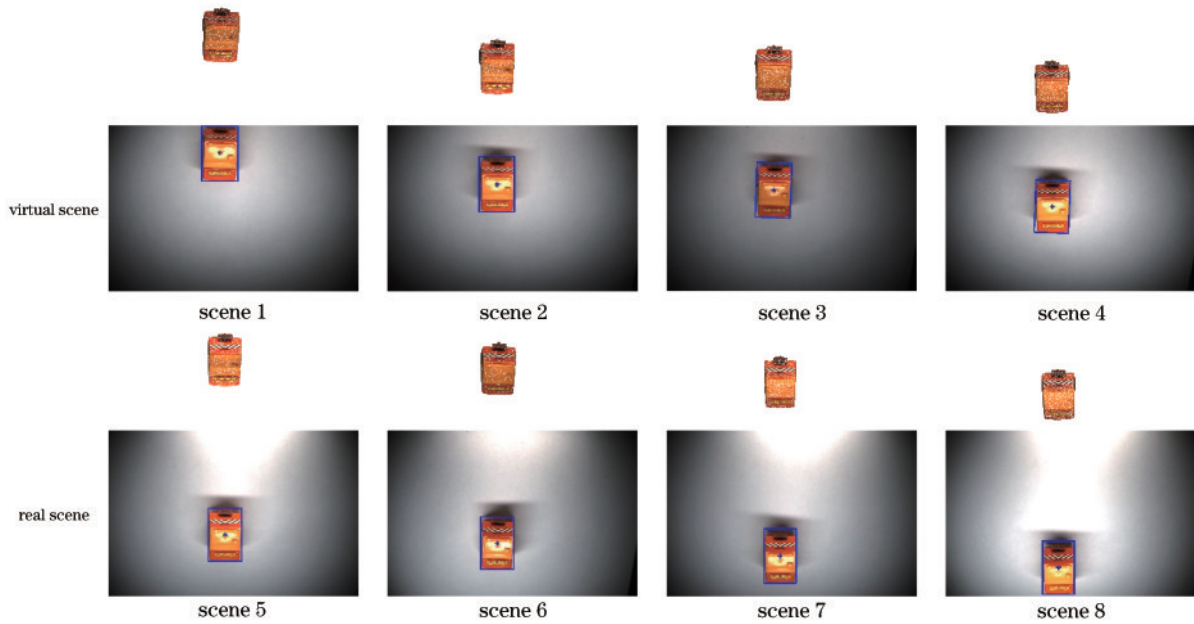


图 13 虚拟场景图与现实场景图  
Fig. 13 Virtual scene and real image of vehicle

表 2 各场景下车辆模型中心点世界坐标  
Table 2 Vehicle center in world coordinate at different scenes

Scene	Vehicle mockup center in world coordinate /mm		
	Actual	Estimated from 2D bounding box	Estimated from colored point cloud
1	(14.87, -65.71, 18.49)	(14.91, -62.89)	(14.88, -65.70, 18.49)
2	(12.78, -34.90, 18.49)	(12.82, -32.05)	(12.78, -35.63, 18.49)
3	(10.48, -28.95, 18.49)	(10.46, -26.21)	(10.48, -30.73, 18.49)
4	(10.33, -13.96, 18.49)	(10.27, -9.97)	(10.34, -15.62, 18.49)
5	(19.79, 7.27, 18.49)	(19.81, 12.79)	(19.83, 5.95, 18.49)
6	(13.55, 14.49, 18.49)	(13.39, 21.18)	(13.45, 12.79, 18.49)
7	(16.78, 26.74, 18.49)	(16.70, 33.84)	(16.76, 23.38, 18.49)
8	(16.28, 33.62, 18.49)	(16.11, 45.38)	(16.21, 31.51, 18.49)



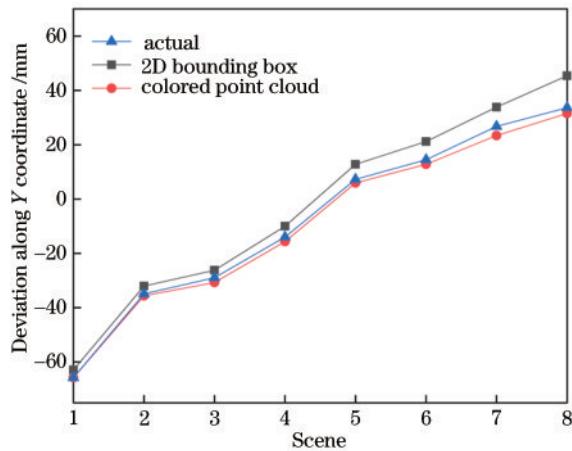


图 14 Y 坐标偏差图

Fig. 14 Deviation diagram along Y coordinate

通过分析表 2 和图 14 可知,在近镜头位置处 2D 包围框中心与真实车辆模型重心较接近,而远离镜头位置则偏差逐渐变大,这是由于镜头边缘存在一定径向畸变,再者随着车辆远离相机安装位置,2D 图像中车辆尾部面积对整幅图像的面积比增大,使得 2D 框中心后移,中心点与真实中心位置偏差变大。由彩色点云数据估算的车辆位置误差随车辆远离相机并没有明显增加,说明所提方法利用单跟踪相机结合彩色点云后能够较准确地实时估计车辆空间重心位置。

## 6 结 论

提出一种基于点云灰度图的多源彩色图像与点云融合方法。构建了空间中多视角点云扫描装置和多彩色相机快速标定模型;利用虚拟成像技术生成点云灰度图,将 3D-2D 配准转换为 2D-2D 配准;因为着色过程中同一 RGB 对应多个三维点,采用点云灰度图中灰度值较高的点作为着色点;在环境或光照条件不良的条件下,彩色相机图像成像效果差,在目标跟踪过程中可能发生 ID 跳变,利用彩色点云,虚拟投影图成像效果好,可用于辅助车辆跟踪时 ID 维持;通过提取目标车辆 2D 包围框,经粗定位和微分姿态调整,利用单相机和彩色点云实时估计车辆重心位置。

实验结果表明了所提方法在桥梁车辆移动荷载监控中应用的可行性,为后续进一步的工程应用打下了坚实的基础。同时,所提方法和思路也为多目标视觉跟踪中的目标再识别和空间定位等难点问题提供了一种解决思路。

## 参 考 文 献

[1] Obrien E J, Enright B. Using weigh-in-motion data to determine aggressiveness of traffic for bridge loading[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(3): 232-239.  
 [2] Ye X W, Dong C Z, Liu T. Image-based structural dynamic displacement measurement using different multi-object tracking algorithms[J]. Smart Structures and

Systems, 2016, 17(6): 935-956.

- [3] Lydon M, Taylor S E, Robinson D, et al. Recent developments in bridge weigh in motion (B-WIM) [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2016, 6 (1): 69-81.  
 [4] Ge L F, Dan D H, Li H. An accurate and robust monitoring method of full-bridge traffic load distribution based on YOLO-v3 machine vision[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(12): e2636.  
 [5] Ge L F, Dan D H, Yan X F, et al. Real time monitoring and evaluation of overturning risk of single-column-pier box-girder bridges based on identification of spatial distribution of moving loads[J]. Engineering Structures, 2020, 210: 110383.  
 [6] Dan D H, Ge L F, Yan X F. Identification of moving loads based on the information fusion of weigh-in-motion system and multiple camera machine vision[J]. Measurement, 2019, 144: 155-166.  
 [7] Li J Y, Gu L, Xu H S, et al. The development and testing of a digital ITER-type mock-up based on virtual reality technology[J]. Fusion Science and Technology, 2021, 77(5): 350-358.  
 [8] 张磊, 徐孝彬, 曹晨飞, 等. 基于动态特征剔除的图像与点云融合的机器人位姿估计方法[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 061001.  
 Zhang L, Xu X B, Cao C F, et al. Robot pose estimation method based on image and point cloud fusion with dynamic feature elimination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 061001.  
 [9] 邵杰, 张爱武, 王书民, 等. 三维激光点云与 CCD 影像融合的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0514001.  
 Shao J, Zhang A W, Wang S M, et al. Research on fusion of 3D laser point clouds and CCD image[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0514001.  
 [10] 张子健, 程效军, 曹宇杰, 等. 结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1110001.  
 Zhang Z J, Cheng X J, Cao Y J, et al. Application of 3D reconstruction of relic sites combined with laser and vision point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (11): 1110001.  
 [11] 汪威, 张开颜, 刘亚川, 等. 一种新能源动力电池顶盖平面度检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 218-225.  
 Wang W, Zhang K Y, Liu Y C, et al. Research on the flatness detection method for cap of the new energy power battery[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 218-225.  
 [12] 刘倩倩. 基于激光点云与图像信息融合的三维场景重建 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 3-6.  
 Liu Q Q. Laser point cloud and image information fusion for 3D scene reconstruction[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 3-6.  
 [13] 宋文松, 张宗华, 高楠, 等. 基于强度信息的激光雷达和相机空间位姿标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0215003.  
 Song W S, Zhang Z H, Gao N, et al. Spatial pose calibration method for lidar and camera based on intensity

- information[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0215003.
- [14] Scaramuzza D, Harati A, Siegwart R. Extrinsic self calibration of a camera and a 3D laser range finder from natural scenes[C]//2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 29-November 2, 2007, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2007: 4164-4169.
- [15] Habib A, Ghanma M, Morgan M, et al. Photogrammetric and lidar data registration using linear features[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(6): 699-707.
- [16] Garcia-Moreno A I, Gonzalez-Barbosa J J, Ornelas-Rodriguez F J, et al. LIDAR and panoramic camera extrinsic calibration approach using a pattern plane[M]// Carrasco-Ochoa J A, Martinez-Trinidad J F, Rodriguez J S, et al. Pattern recognition. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2013, 7914: 104-113.
- [17] Klimentjew D, Hendrich N, Zhang J W. Multi sensor fusion of camera and 3D laser range finder for object recognition[C]//2010 IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration, September 5-7, 2010, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE Press, 2010: 236-241.
- [18] Rushmeier H, Gomes J, Giordano F, et al. Design and use of an In-museum system for artifact capture[C]//2003 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, June 16-22, 2003, Madison, WI, USA. New York: IEEE Press, 2003: 8.
- [19] 沙欧, 吕源治, 凌剑勇, 等. 三维激光扫描系统中目标点云的颜色复原[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2158-2167.
- Sha O, Lü Y Z, Ling J Y, et al. Color restoration of object surface point cloud in three-dimensional laser scanning system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2158-2167.
- [20] Faugeras O D, Toscani G. The calibration problem for stereo[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 22-26, 1986, Miami Beach, Florida. New York: IEEE Press, 1986: 15-20.
- [21] He W, Deng L, Shi H, et al. Novel virtual simply supported beam method for detecting the speed and axles of moving vehicles on bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(4): 04016141.
- [22] Wang F B, Tu P, Wu C, et al. Multi-image mosaic with SIFT and vision measurement for microscale structures processed by femtosecond laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 100: 124-130.