

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205942

# 单轴转台上 2D 激光雷达的位姿估计\*

刘昶<sup>1</sup> 姜楠<sup>1</sup> 贾峻权<sup>2</sup> 曲广宇<sup>1</sup>

(1. 沈阳理工大学信息科学与工程学院 沈阳 110159; 2. 苏州博实慧源智能科技有限公司 苏州 215332)

**摘要:**针对单轴转台搭载 2D 激光雷达进行场景扫描的系统中的激光雷达动态位姿估计问题,提出一种利用 V 形棋盘格标定板进行位姿估计的方法。通过相机拍摄标定板上的两条光条直线的图像,提取光条直线特征,计算光平面及两条光条在相机坐标系下的方程;再结合雷达提供的扫描数据,计算出雷达坐标系与相机坐标系的变换关系;通过控制转台做 3 次以上的旋转运动,解算出转台轴在相机坐标系下的直线方程,拟合出雷达光心、雷达坐标系的坐标轴关于转台旋转角度的函数关系。位姿估计实验中计算得到的雷达光心位置与样本的平均误差在 1.2 mm 以内,计算得到的雷达坐标轴方向与样本的平均误差在 0.7° 以内;目标测量实验中通过单轴转台搭载 2D 激光雷达对目标尺寸测量的平均误差在 3 mm 以内。实验结果表明该方法具有较好的准确性。

**关键词:**计算机视觉;位姿估计;标定;2D 激光雷达

**中图分类号:** TP391; TN249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

## Pose determination of 2D LiDAR on uniaxial turntable

Liu Chang<sup>1</sup> Jiang Nan<sup>1</sup> Jia Junquan<sup>2</sup> Qu Guangyu<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Suzhou Boshihuiyuan Intelligent Technology Co., Ltd., Suzhou 215332, China)

**Abstract:** A method using a V shaped chessboard was proposed to address the dynamic pose determination problem of 2D LiDARs mounted on uniaxial turntables in scene scanning systems. From the image of the laser stripes on the calibration planes captured by a camera, the line features of the stripes were extracted. Then the laser plane equation and two-line equations of laser stripes in the camera coordinate system were computed. Using scanning data from the LiDAR, the transformation between the LiDAR and the camera coordinate systems was acquired. By controlling the turntable rotate three times or more, the functions of the turntable axis, the LiDAR center, and the LiDAR coordinate system w. r. t the rotation angle of the turntable were estimated. In the pose determination experiment, the average error between the calculated LiDAR centers and the samples is less than 1.2 mm, the average angle errors between the calculated LiDAR coordinate axes and the samples are less than 0.7°. In the experiment of object measurement using a 2D LiDAR mounted on a uniaxial turntable, the object size error is less than 3 mm. The experimental results showed a good accuracy of the presented method.

**Keywords:** computer vision; pose determination; calibration; 2D LiDAR

## 0 引言

近年来激光雷达被广泛应用在自动驾驶、服务机器人等领域,由于其可提供深度信息,因此可作为二维面阵

相机的有益补充,实现目标识别与定位、环境感知、地图构建等功能。激光雷达通常可分为 2D 和 3D 两种,由于 2D 激光雷达能实现更高精度的测量,因此常被应用在工业领域中的高精度定位或测量问题中,但由于 2D 激光雷达每次扫描只能获取一个扫描平面的深度信息,为了得

到 3D 场景的深度信息,一般需要利用机器人或其他运动机构带动雷达运动,如将雷达安装在单轴转台上对场景进行扫描<sup>[1-2]</sup>,这就需要标定 2D 激光雷达在基准坐标系下的位姿,用于恢复场景的准确的三维信息。

由于目前很多应用中采用的是激光雷达配合可见光相机的方案<sup>[3-5]</sup>,关于激光雷达的位姿估计问题的研究主要集中在雷达与相机的外参标定方法上,在需要一定精度的测量场合,一般采用经特殊设计的标定板,利用雷达获取的扫描点与相机获取的面、线、点等特征间存在的约束,通过优化的方法求解它们间的位姿关系。Itami 等<sup>[6]</sup>提出利用棋盘格标定板建立点-面约束,即雷达扫描的空间点一定位于由相机确定的标定板平面上,构造约束求解;Vasconcelos 等<sup>[7]</sup>则利用雷达光线必位于标定平面上建立线-面约束,并将问题转化为 P3P 问题,得到问题的 8 个闭式解,再判别正确解;彭梦等<sup>[8-9]</sup>、Zhou 等<sup>[10]</sup>对 Vasconcelos 等的方法进行了改进,通过优化判别正确的条件降低了算法的复杂性;祝飞等<sup>[11]</sup>利用 V 形棋盘格标定板建立点-线约束,即雷达获取的两条光条直线的交点必位于相机确定的标定板交线上,再综合前述的点-面、线-面约束,通过加权的方法构造目标函数优化求解。也有学者利用标定板的边缘特征进行标定,Zhou 等<sup>[12]</sup>利用具有直线边界的棋盘格标定板构造点-线约束,即雷达扫描的棋盘格边界点一定位于通过相机确定的标定板边缘直线上,通过求解雷达平面与标定平面间的单应来估计位姿;Dong 等<sup>[13]</sup>利用两片三角形棋盘格构成 V 形标定板,利用边界点对应增加了单次采样所获得的约束条件;董方新等<sup>[14]</sup>设计了镂空棋盘格,通过雷达扫描点云获取标定板上圆孔中心的坐标,从而建立了雷达扫描平面与像平面间点-点对应用于问题求解;黄志清等<sup>[15]</sup>利用贴有半透膜的镂空标定板,首先通过雷达确定标定板上的不可见光条位置,再通过屏幕人为绘制一条直线供相机识别,从而建立镂空边界点的点-点对应关系用于问题求解;Naroditsky 等<sup>[16]</sup>利用了具有黑白条纹的标定板,通过激光的反射强度检测条纹的边缘,建立线-面约束求解;Guo 等<sup>[17]</sup>利用中间位置具有一条黑线的白色方形标定板,通过雷达扫描标定板的边界计算中点,建立点-线约束求解。但由于 2D 激光雷达的扫描角分辨率有限,以及雷达在扫描目标边界时容易出现较大的深度误差,可能导致边缘点定位不够准确,因此这类方法不适合对精度要求较高的测量场合。针对安装在汽车上的 2D 激光雷达的标定问题,杨超等<sup>[18]</sup>针对雷达与移动机器人具有固定位姿的情况,采用车载里程计与激光帧间匹配的方法进行标定;刘今越等<sup>[19]</sup>则利用帧间的点云匹配构造激光里程计,配合视觉里程计求取雷达与相机间的位姿。

以上研究多数是在假设激光不可见的条件下进行的,如此假定的原因是目前激光雷达的激光束大多采用

了人眼不可见的红外光,但实际上,大部分激光雷达采用的是波长为 905 nm 或以下的红外光,甚至有部分雷达直接采用了人眼可见的红光,该波长范围的激光在很多型号的可见光相机上是可以感光的,不一定必须采用红外相机,这就为利用可见光相机拍摄激光光斑或光条进行雷达标定提供了可能。本文针对单轴转台搭载 2D 激光雷达对场景进行 3D 扫描的应用场合,研究在激光扫描光条可成像,但光斑点特征不可提取条件下的 2D 激光雷达的位姿估计问题,提出利用 V 形棋盘格标定板作为辅助工具进行标定的方法。

## 1 2D 激光雷达的固定位姿估计

### 1.1 原理与计算流程

本文采用 V 形标定装置进行雷达的位姿估计,该装置由两块棋盘格平面标定板拼接构成,因此存在两个标定平面,为便于观察,它们的夹角小于  $180^\circ$ ,不要求已知夹角的准确值。当相机与 2D 激光雷达位姿相对固定时,雷达投射到标定板上将形成两条直线光条,利用雷达的扫描结果可求得两条直线在雷达坐标系下的方程;若两条直线光条能被相机成像,可利用相机拍摄的图像求取它们在相机坐标系下的直线方程。由此获得了 2 条共面直线在雷达坐标系和相机坐标系下的对应,可解算出雷达坐标系与相机坐标系间的变换关系,求得 2D 激光雷达在相机坐标系下的位姿。位姿估计的流程如图 1 所示,下面对流程中的主要步骤进行详细描述。

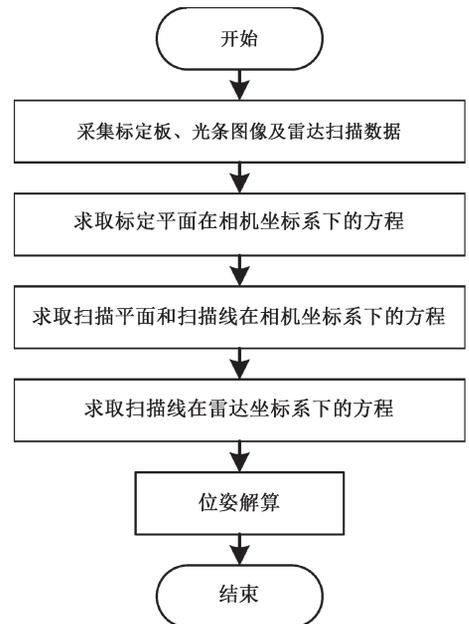


图 1 激光雷达位姿估计流程

Fig. 1 Flow chat of LiDAR pose determination

### 1.2 标定平面在相机坐标系下的方程

求取标定平面在相机坐标系下的方程问题是一个相机外参的标定问题。在平面标定板上定义平面标定坐标系  $O_p - \tilde{x} \tilde{y}$ ，再按右手法则生成三维坐标系  $O_p - \tilde{x} \tilde{y} \tilde{z}$ ，其与相机坐标系  $O_c - \bar{x}\bar{y}\bar{z}$  的变换关系为：

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{p \rightarrow c} \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} + \mathbf{T}_{p \rightarrow c} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{R}_{p \rightarrow c}$  和  $\mathbf{T}_{p \rightarrow c}$  是坐标变换中的旋转矩阵和平移向量。假定相机已事先完成内参标定，并对拍摄的图像进行了畸变校正（本文后文所述图像均指校正后的图像）。

设标定平面上的物点  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  在图像中的对应像点为  $(u, v)$ ，根据相机的针孔模型，有：

$$t \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{H} \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{T}_{p \rightarrow c}) \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中： $t$  为比例因子， $\mathbf{H}$  为标定平面与像平面的单应矩阵，相机内参矩阵  $\mathbf{K}$  为已标定的相机内参矩阵， $\mathbf{r}_1$  和  $\mathbf{r}_2$  为  $\mathbf{R}_{p \rightarrow c}$  的左两列。本文采用 SVD 分解的方法<sup>[20]</sup>对旋转矩阵进行估计，再采用最小二乘方法估计平移向量  $\mathbf{T}_{p \rightarrow c}$ 。最后通过  $\mathbf{H} = \mathbf{K}(\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{T}_{p \rightarrow c})$  计算出  $\mathbf{H}$  的最终估计。

由于标定平面上的物点满足  $\tilde{z} = 0$ ，物点在相机坐标系下的坐标  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  可由其在图像中的对应像点坐标  $(u, v)$  根据式(2)和(1)计算出来。同理如式(1)所示，标定平面在相机坐标系下的平面方程为：

$$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \cdot \mathbf{r}_3 = \mathbf{T}_{p \rightarrow c}^T \cdot \mathbf{r}_3 \quad (3)$$

式中： $\mathbf{r}_3$  为  $\mathbf{R}_{p \rightarrow c}$  的最右列。

### 1.3 雷达扫描平面和扫描线在相机坐标系下的方程

为实现对雷达扫描平面的定位，针对标定装置的每个平面，利用 1.2 节的方法可获得平面在相机坐标系下的平面方程，并且均可由图像点计算对应的平面上的物点在相机坐标系下坐标。

如图 2 所示，雷达的扫描线在 V 形标定板平面上分别形成直线光条  $L_1$  和  $L_2$ ，相机坐标系下对应的单位方向向量分别为  $\bar{l}_1$  和  $\bar{l}_2$ ，在  $L_1$  和  $L_2$  可成像的情况下，可由  $L_1$  和  $L_2$  确定扫描平面  $\Pi_L$ 。本文采用平面拟合的方法获取  $\Pi_L$  的平面方程，不妨设  $\Pi_L$  不过相机光心，可设  $\Pi_L$  在相机坐标系下的平面方程为：

$$a_L \bar{x} + b_L \bar{y} + c_L \bar{z} = 1 \quad (4)$$

首先从图像中提取  $L_1$  和  $L_2$  上的特征点图像坐标，再

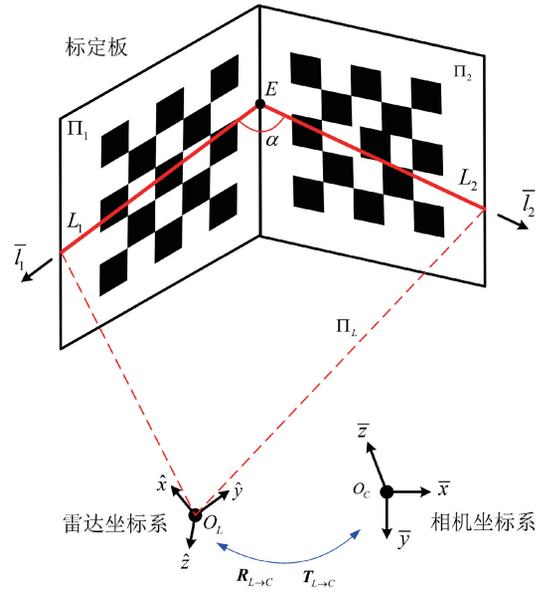


图 2 扫描平面定位原理示意图

Fig. 2 Illustration of scanning plane localization principle

计算对应物点的相机坐标系坐标，作为式(4)的样本点，利用最小二乘法获取平面参数  $a_L, b_L$  和  $c_L$  的估计值，则该扫描平面的单位法向量为  $\bar{n}_L = \frac{\pm (a_L, b_L, c_L)^T}{\sqrt{a_L^2 + b_L^2 + c_L^2}}$ 。

由式(3)和(4)计算得到  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_L$  的平面方程后，计算出它们的交点  $E$  的坐标  $(\bar{x}_E, \bar{y}_E, \bar{z}_E)$ ，并进一步得到  $L_1$  和  $L_2$  在相机坐标系下的单位方向向量  $\bar{l}_1$  和  $\bar{l}_2$ ，以及  $\bar{l}_1$  和  $\bar{l}_2$  间的夹角  $\alpha = \arccos(\bar{l}_1 \cdot \bar{l}_2)$ 。

### 1.4 扫描线在雷达坐标系下的方程

如图 2 所示，以激光雷达的光心  $O_L$  为原点定义雷达坐标系  $O_L - \hat{x}\hat{y}\hat{z}$ ，其  $\hat{x}$  方向为雷达的  $0^\circ$  角扫描方向， $\hat{y}$  轴在扫描面上与  $\hat{x}$  轴垂直，对应  $90^\circ$  角扫描方向，再按右手法则确定  $\hat{z}$  轴。设雷达坐标系与相机坐标系的变换关系为：

$$\begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{L \rightarrow C} \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} + \mathbf{T}_{L \rightarrow C} \quad (5)$$

式中： $\mathbf{R}_{L \rightarrow C}$  和  $\mathbf{T}_{L \rightarrow C}$  为坐标变换的旋转矩阵和平移向量。若记激光雷达的某条扫描线与目标的交点为  $P$ ，该激光线的射出角度为  $\theta$ ，激光雷达测量得到的深度为  $\rho$ ，则在雷达激光平面坐标系下， $P$  点的坐标  $(\hat{x}, \hat{y})$  为：

$$\begin{cases} \hat{x} = \rho \cos \theta \\ \hat{y} = \rho \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

如图 3 所示，从雷达的扫描结果中提取  $L_1$  和  $L_2$  的样

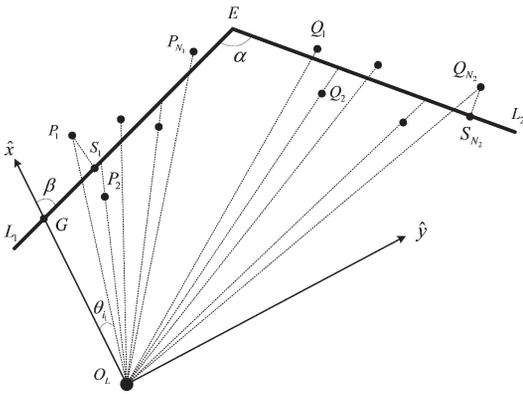


图 3 雷达光心定位原理示意图

Fig. 3 Illustration of LiDAR center localization principle

本点集,分别记为  $\{P_1, P_2, \dots, P_{N_1}\}$  和  $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_{N_2}\}$ , 其中  $N_1$  和  $N_2$  分别表示点集中点的个数,这里不妨记它们的下标按扫描角度升序排列。不失一般性,设  $L_1$  与  $L_2$  均与雷达坐标系的  $\hat{x}$  轴不垂直,设  $L_1$  在扫描面上的直线方程为:

$$\hat{y} = \lambda \hat{x} + \eta_1 = \tan \beta \cdot \hat{x} + \eta_1 \quad (7)$$

式中:  $\lambda$  为直线  $L_1$  的斜率,  $\beta$  为直线  $L_1$  与  $\hat{x}$  轴的夹角,有  $\lambda = \tan \beta$ , 则  $L_2$  的直线方程可表示为:

$$\hat{y} = \tan(\beta - \alpha) \hat{x} + \eta_2 = \frac{\cos \alpha \cdot \lambda - \sin \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \lambda} \cdot \hat{x} + \eta_2 \quad (8)$$

因此两条直线的方程由参数  $\lambda, \eta_1, \eta_2$  确定。本文采用以下方法对这 3 个参数进行估计:

首先利用样本点  $\{P_1, P_2, \dots, P_{N_1}\}$  对  $L_1$  进行最小二乘拟合,得到  $\lambda$  的初步估计值记为  $\lambda_0$ , 记:

$$\beta_0 = \begin{cases} \arctan \lambda_0, \lambda_0 \geq 0 \\ \pi + \arctan \lambda_0, \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

将式(7)改写成近似归一化形式:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \lambda_0^2}} \hat{x} \lambda + \frac{\eta_1}{\sqrt{1 + \lambda_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda_0^2}} \hat{y} \quad (10)$$

记  $\Phi = \sqrt{1 + \left(\frac{\cos \alpha \cdot \lambda_0 - \sin \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \lambda_0}\right)^2}$ , 根据式(8),  $L_2$  的直线方程的归一化形式可近似表示为:

$$\frac{1}{\Phi} \left( \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \lambda_0} \right) \cdot \hat{x} \cdot \lambda + \frac{\eta_2}{\Phi} \approx \frac{1}{\Phi} \hat{y} + \frac{1}{\Phi} \left( \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \lambda_0} \right) \cdot \hat{x} \quad (11)$$

以  $\lambda, \eta_1, \eta_2$  为优化参数,  $L_1$  和  $L_2$  的直线方程(10)和(11)构成它们的线性约束方程,分别将  $\{P_1, P_2, \dots, P_{N_1}\}$  和  $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_{N_2}\}$  作为式(10)和(11)的样本点,利用最小二乘法求取 3 个待优化参数的估计值。

根据优化结果和式(7)、(8)获得  $L_1$  和  $L_2$  在雷达坐标系下的直线方程后,求得它们的交点  $E$  的坐标,记为  $E(\hat{x}_E, \hat{y}_E, 0)$ ; 计算  $P_1$  在  $L_1$  的垂直投影点坐标  $S_1(\hat{x}_{S_1}, \hat{y}_{S_1}, 0)$ ,  $Q_{N_2}$  在  $L_2$  的垂直投影点坐标  $S_{N_2}(\hat{x}_{S_{N_2}}, \hat{y}_{S_{N_2}}, 0)$ ; 计算  $\overrightarrow{ES_1}$  和  $\overrightarrow{ES_{N_2}}$  在雷达坐标系下的单位向量分别为:

$$\begin{cases} \hat{l}_1 = (\hat{x}_{S_1} - \hat{x}_E, \hat{y}_{S_1} - \hat{y}_E, 0)^T / \|(\hat{x}_{S_1} - \hat{x}_E, \hat{y}_{S_1} - \hat{y}_E, 0)\| \\ \hat{l}_2 = (\hat{x}_{S_{N_2}} - \hat{x}_E, \hat{y}_{S_{N_2}} - \hat{y}_E, 0)^T / \|(\hat{x}_{S_{N_2}} - \hat{x}_E, \hat{y}_{S_{N_2}} - \hat{y}_E, 0)\| \end{cases} \quad (12)$$

### 1.5 位姿解算

根据两条光条直线的单位方向向量在相机坐标系和雷达坐标系下的值,代入式(5),可得两个坐标系变换的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_{L \rightarrow C} = (\bar{l}_1, \bar{l}_2, \bar{l}_1 \times \bar{l}_2) \cdot (\hat{l}_1, \hat{l}_2, \hat{l}_1 \times \hat{l}_2)^{-1} \quad (13)$$

再将  $E$  在两个坐标系下的坐标代入式(5),可得两个坐标系变换的平移向量为:

$$\mathbf{T}_{L \rightarrow C} = \begin{pmatrix} \hat{x}_E \\ \hat{y}_E \\ \hat{z}_E \end{pmatrix} - \mathbf{R}_{L \rightarrow C} \cdot \begin{pmatrix} \hat{x}_E \\ \hat{y}_E \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$\mathbf{T}_{L \rightarrow C}$  即为雷达光心  $O_L$  在相机坐标系下的坐标;雷达坐标系  $\hat{x}$  轴在相机坐标系下的单位方向向量为  $\mathbf{R}_{L \rightarrow C}$  的第 1 列,记为  $\bar{n}_x; \bar{n}_z$  为  $\mathbf{R}_{L \rightarrow C}$  的第 3 列。

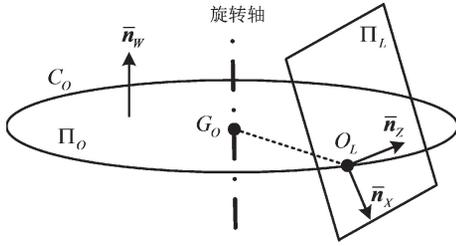
以上方法仅利用雷达进行一次扫描,同时利用相机拍摄一幅标定板上的光条图像,实现了相机坐标系与雷达坐标系变换关系的解算。与前人提出的方法不同,该方法假设雷达在两个标定平面上的扫描线可以被相机成像,实际上利用了比前人方法更多的信息,因此能够获得较高精度的位姿估计结果。考虑到多数的可见光相机能够对波长为 905 nm 或以下的光波成像,因此该方法适用于以上波长范围的激光雷达。另外,该方法的计算过程是线性的,因此计算时间可控。

## 2 转台上 2D 激光雷达的动态位姿估计

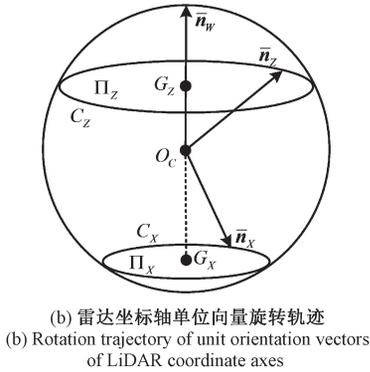
### 2.1 原理与计算流程

在保证激光雷达的扫描平面与两片标定板均相交的前提下,控制转台旋转,这时固定在转台上的激光雷达以及扫描平面也将随转台绕转轴旋转。如图 4 所示,随着转台的旋转,  $O_L$  的轨迹为圆,记为  $C_O$ , 其圆心  $G_O$  在旋转轴上,其所在的平面  $\Pi_O$  与转轴垂直;同时雷达坐标系的  $\hat{z}$  轴和  $\hat{x}$  轴在相机坐标系下的单位向量  $\bar{n}_z$  与  $\bar{n}_x$  各自的终点也在相机坐标系的单位球上沿圆周运动,设对应的轨迹圆分别为  $C_Z$  和  $C_X$ , 圆心分别为  $G_Z$  和  $G_X$ , 记  $C_Z$  和  $C_X$

所在的平面分别是  $\Pi_Z$  和  $\Pi_X$ , 则  $\Pi_O$ 、 $\Pi_Z$  和  $\Pi_X$  3 个平面平行, 它们的法向量均为转轴的方向向量  $\bar{n}_w$ 。设转台转动的角度为  $\psi$ , 则  $O_L$  的坐标、 $\bar{n}_z$ 、 $\bar{n}_x$  及光平面  $\Pi_L$  的方程均可看作是  $\psi$  的函数, 分别记为  $\bar{O}_L(\psi)$ 、 $\bar{n}_z(\psi)$ 、 $\bar{n}_x(\psi)$  和  $\Pi_L(\psi)$ , 找到它们关于  $\psi$  的具体表达形式是 2D 激光雷达随转台转动时动态位姿估计的目标。本文通过维持相机和标定板位置不变, 控制转台旋转  $N(N \geq 3)$  次, 获取相关量的样本后对以上函数进行估计。具体流程如图 5 所示, 下面对流程中的主要步骤进行详细描述。



(a) 雷达光心旋转轨迹  
(a) Rotation trajectory of LiDAR center



(b) 雷达坐标轴单位向量旋转轨迹  
(b) Rotation trajectory of unit orientation vectors of LiDAR coordinate axes

图 4 雷达随转台旋转的示意图

Fig. 4 Illustration of LiDAR rotating with turntable

## 2.2 轴定位

不失一般性, 设相机光心不过  $\Pi_O$ 、 $\Pi_Z$  和  $\Pi_X$ , 3 个平面在相机坐标系下的方程分别为:

$$\Pi_O: a_w \bar{x} + b_w \bar{y} + c_w \bar{z} = d_L \quad (15)$$

$$\Pi_Z: a_w \bar{x} + b_w \bar{y} + c_w \bar{z} = d_Z \quad (16)$$

$$\Pi_X: a_w \bar{x} + b_w \bar{y} + c_w \bar{z} = d_X \quad (17)$$

式中:  $a_w$ 、 $b_w$ 、 $c_w$ 、 $d_L$ 、 $d_Z$ 、 $d_X$  为待估参数, 满足  $a_w^2 + b_w^2 + c_w^2 = 1$ 。记  $\bar{O}_L^{(S1)}(\psi_i)$ 、 $\bar{n}_z^{(S1)}(\psi_i)$ 、 $\bar{n}_x^{(S1)}(\psi_i)$  为通过 1.3 和 1.5 节方法获取到的雷达光心坐标及坐标轴单位方向向量的样本(这里  $\psi_i$  是第  $i$  个位置对应的转台的旋转角度,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 不妨设  $\psi_i$  按升序排列), 考虑到  $\bar{n}_z^{(S1)}(\psi_i)$  是最先获取到的样本, 本文利用其作为样本通过最小二乘法求取式(16)中的 4 个参数的估计值, 从而估计出  $\Pi_Z$  的方程, 其单位法向量  $\bar{n}_w = (a_w, b_w, c_w)^T$  即为转轴的单位方向向量。

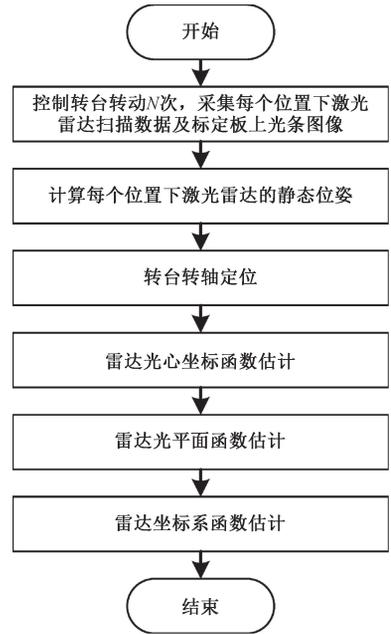


图 5 转台上激光雷达位姿估计流程

Fig. 5 Flow chat of pose determination of LiDAR on turntable

再计算  $d_L$  和  $d_X$  的估计值, 分别为  $d_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{n}_w^T \cdot \bar{O}_L^{(S1)}(\psi_i))$  和  $d_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{n}_w^T \cdot \bar{n}_x^{(S1)}(\psi_i))$ , 从而得到 3 个平面的方程。

记  $\bar{O}_L^{(S1)}(\psi_i)$  表达的点为  $O_L^{(S1)}(\psi_i)$ , 将其向  $\Pi_O$  平面作垂直投影, 记投影点为  $O_L^{(S2)}(\psi_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。以  $O_L^{(S2)}(\psi_i)$  为样本利用最小二乘法对  $C_O$  进行圆估计, 得到圆心  $G_O$  在相机坐标系下的坐标  $\bar{G}_O$  及半径  $r_O$ 。

由于转轴过  $G_O$  点, 且该轴线的单位方向向量为  $\bar{n}_w$ , 可得转轴在相机坐标系下的直线方程为:

$$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})^T - \bar{G}_O = \xi \cdot \bar{n}_w \quad (18)$$

式中:  $\xi$  为比例因子。

## 2.3 雷达光心坐标函数估计

记由于采样误差导致的样本向量  $\overrightarrow{G_O O_L^{(S2)}(\psi_1)}$  与真实向量  $\overrightarrow{G_O O_L(\psi_1)}$  的夹角为  $\Delta\psi_L$ 。分别计算  $\overrightarrow{G_O O_L^{(S2)}(\psi_i)}$  与  $\overrightarrow{G_O O_L^{(S2)}(\psi_1)}$  的夹角, 记为  $\psi_{L,i}^{(S2)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 利用式(19)对  $\Delta\psi_L$  进行估计:

$$\Delta\psi_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\psi_i - \psi_1 - \psi_{L,i}^{(S2)}) \quad (19)$$

计算射线  $G_O O_L^{(S2)}(\psi_1)$  与圆  $C_O$  的交点的坐标

$$\bar{O}_L^{(S3)}(\psi_1) = \bar{G}_O + r_O \cdot \frac{\overrightarrow{G_O O_L^{(S2)}(\psi_1)}}{\| \overrightarrow{G_O O_L^{(S2)}(\psi_1)} \|}$$

进而向量  $\overrightarrow{G_O O_L(\psi)}$  可以通过  $\overrightarrow{G_O O_L^{(S3)}(\psi_1)}$  以  $\bar{n}_w$  为转轴, 旋转  $\phi_L = \psi - \psi_1 - \Delta\psi_L$  角后得到, 由 Rodrigues 旋转公式有:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{G_o O_L(\psi)} &= \mathbf{p}_L \times \overrightarrow{G_o O_L^{(S3)}(\psi_1)} \cdot \sin(\phi_L) + \\ &\overrightarrow{G_o O_L^{(S3)}(\psi_1)} \cdot \cos(\phi_L) \end{aligned} \quad (20)$$

式中:  $\mathbf{p}_L = \frac{\overrightarrow{G_o O_L^{(S2)}(\psi_1)} \times \overrightarrow{G_o O_L^{(S2)}(\psi_N)}}{\|\overrightarrow{G_o O_L^{(S2)}(\psi_1)} \times \overrightarrow{G_o O_L^{(S2)}(\psi_N)}\|}$ , 其与  $\bar{\mathbf{n}}_w$  方向相同或相反, 则  $O_L(\psi)$  在相机坐标系下的坐标为:

$$\bar{O}_L(\psi) = \bar{G}_o + \overrightarrow{G_o O_L(\psi)} \quad (21)$$

## 2.4 雷达光平面函数估计

如图 4(b) 所示,  $C_z$  的圆心  $G_z$  为  $O_c$  在  $\Pi_z$  平面上的垂直投影点, 其坐标记为  $\bar{G}_z$ ;  $C_z$  的半径为  $r_z = \sqrt{1 - d_z^2}$ 。记  $V_z(\psi)$  是  $\bar{\mathbf{n}}_z(\psi)$  的终点,  $V_z^{(S2)}(\psi_i)$  为  $\bar{\mathbf{n}}_z^{(S1)}(\psi_i)$  终点在  $\Pi_z$  平面上的垂直投影点; 记由于采样误差导致的  $\overrightarrow{G_z V_z^{(S2)}(\psi_1)}$  与  $\overrightarrow{G_z V_z(\psi_1)}$  的夹角为  $\Delta\psi_z$ , 采用类似 2.3 节的过程, 分别计算  $\overrightarrow{G_z V_z^{(S2)}(\psi_i)}$  与  $\overrightarrow{G_z V_z^{(S2)}(\psi_1)}$  的夹角, 记为  $\psi_{z,i}^{(S2)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 对  $\Delta\psi_z$  进行估计:

$$\Delta\psi_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\psi_i - \psi_1 - \psi_{z,i}^{(S2)}) \quad (22)$$

计算射线  $G_z V_z^{(S2)}(\psi_1)$  与圆  $C_z$  的交点  $V_z^{(S3)}(\psi_1)$  的坐标, 记  $\mathbf{p}_z = \frac{\overrightarrow{G_z V_z^{(S2)}(\psi_1)} \times \overrightarrow{G_z V_z^{(S2)}(\psi_N)}}{\|\overrightarrow{G_z V_z^{(S2)}(\psi_1)} \times \overrightarrow{G_z V_z^{(S2)}(\psi_N)}\|}$ ,  $\mathbf{p}_z$  与  $\bar{\mathbf{n}}_w$  方向相同或相反, 则向量  $\overrightarrow{G_z V_z(\psi)}$  可以通过  $\overrightarrow{G_z V_z^{(S3)}(\psi_1)}$  以  $\mathbf{p}_z$  为旋转轴, 旋转  $\phi_z = \psi - \psi_1 - \Delta\psi_z$  得到, 计算公式为:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{G_z V_z(\psi)} &= \mathbf{p}_z \times \overrightarrow{G_z V_z^{(S3)}(\psi_1)} \cdot \sin(\phi_z) + \\ &\overrightarrow{G_z V_z^{(S3)}(\psi_1)} \cdot \cos(\phi_z) \end{aligned} \quad (23)$$

则  $\bar{\mathbf{n}}_z(\psi)$  可通过  $\bar{\mathbf{n}}_z(\psi) = \bar{G}_z + \overrightarrow{G_z V_z(\psi)}$  计算得到。在确定了雷达光心  $O_L(\psi)$  的坐标及激光扫描平面的单位法向量  $\bar{\mathbf{n}}_z(\psi)$  后, 光平面的方程  $\Pi_L(\psi)$  被确定下来, 为:

$$((\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})^T - \bar{O}_L(\psi))^T \cdot \bar{\mathbf{n}}_z(\psi) = 0 \quad (24)$$

## 2.5 雷达坐标系函数估计

如图 4(b) 所示, 雷达坐标系的  $\hat{x}$  轴方向的单位向量  $\bar{\mathbf{n}}_x(\psi)$  的终点必位于  $\Pi_x$  上, 也必与  $\bar{\mathbf{n}}_z(\psi)$  垂直, 因此满足方程组:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{n}}_w^T \cdot \bar{\mathbf{n}}_x(\psi) = d_x \\ \bar{\mathbf{n}}_z^T(\psi) \cdot \bar{\mathbf{n}}_x(\psi) = 0 \\ \|\bar{\mathbf{n}}_x(\psi)\| = 1 \end{cases} \quad (25)$$

方程组 (25) 的解算会演变为一个二次方程, 因此有两组解, 计算  $\bar{\mathbf{n}}_z(\psi_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 的值并代入方程组 (25), 获得两组解序列, 分别记为  $\bar{\mathbf{n}}_x^{(1)}(\psi_i)$  和  $\bar{\mathbf{n}}_x^{(2)}(\psi_i)$ 。分别计算它们与  $\bar{\mathbf{n}}_x^{(S1)}(\psi_i)$  的余弦相似度之和  $S_1 =$

$\sum_{i=1}^N ((\bar{\mathbf{n}}_x^{(1)}(\psi_i))^T \bar{\mathbf{n}}_x^{(S1)}(\psi_i))$ ,  $S_2 = \sum_{i=1}^N ((\bar{\mathbf{n}}_x^{(2)}(\psi_i))^T \bar{\mathbf{n}}_x^{(S1)}(\psi_i))$ , 选二者中较大值对应的解序列为真解, 在计算  $\bar{\mathbf{n}}_x(\psi)$  时也取同一解法得到的解为真解。

在获得雷达坐标系的原点坐标  $\bar{O}_L(\psi)$ ,  $\hat{z}$  轴单位向量  $\bar{\mathbf{n}}_z(\psi)$ ,  $\hat{x}$  轴单位向量  $\bar{\mathbf{n}}_x(\psi)$  后, 雷达坐标系在转台旋转角度为  $\psi$  时与相机坐标系的变换关系被完全确定下来, 其中旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_{L \rightarrow C}(\psi) = (\bar{\mathbf{n}}_x(\psi), \bar{\mathbf{n}}_z(\psi) \times \bar{\mathbf{n}}_x(\psi), \bar{\mathbf{n}}_z(\psi)) \quad (26)$$

平移向量为:

$$\mathbf{T}_{L \rightarrow C}(\psi) = \bar{O}_L(\psi) \quad (27)$$

至此, 激光雷达随转台旋转时的位姿被完全确定下来。在激光雷达获取目标点的位置  $(\rho, \theta)$  后, 根据式 (5)、(6), 目标点在相机坐标系下的坐标为:

$$\begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{L \rightarrow C}(\psi) \begin{pmatrix} \rho \cos \theta \\ \rho \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} + \mathbf{T}_{L \rightarrow C}(\psi) \quad (28)$$

## 3 实验研究

### 3.1 雷达坐标系估计精度实验

为验证本文提出的雷达坐标系估计方法的精确性进行实验, 实验中 2D 激光雷达选用 SICK 公司的 LMS4121R-13000 型号雷达, 该雷达采用 660 nm 红色激光, 扫描角度分辨为  $0.0833^\circ$ ; 将雷达固定在高精度转台上; 选用的 V 形标定板由 2 块棋盘格标定板构成, 每块标定板上角点个数为  $14 \times 20$ , 相邻角点间距为 20 mm; 2 块标定板间的夹角大约是  $120^\circ$ ; 相机采用 Basler 的 acA1600-20gc, 配 12 mm 定焦镜头, 采集的图像为灰度图像, 尺寸为  $1624 \text{ pixels} \times 1234 \text{ pixels}$ , 相机内参提前完成标定, 相机的内参矩阵标定结果为:  $\mathbf{K} = \begin{pmatrix} 2757.4 & 0 & 831.6 \\ 0 & 2758.6 & 638.9 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ , 镜头畸变模型采用了仅包含一阶、二阶径向畸变的模型, 畸变系数分别为  $k_1 = -0.076$  和  $k_2 = 0.371$ 。

实验装置如图 6 所示, 实验中始终固定相机、标定板、转台的相对位置, 首先在较亮环境下拍摄标定板图像用于标定板的定位, 图 7 为拍摄的标定板图像; 然后降低环境光亮度, 再控制转台每次旋转  $0.25^\circ$ , 增加相机的曝光时间并拍摄标定板上的雷达光条图像; 同时记录雷达输出的样本点角度和深度数据, 共采集 87 个旋转角度下的光条图像和深度样本点数据用于计算。图 8 为相机拍摄的第 1 幅雷达光条图像。

根据采集的图像和雷达数据, 采用本文第 1 节方法计算在相机坐标系下每个位置的雷达坐标系原点 (即雷



图 6 雷达坐标系定位实验装置

Fig. 6 Experimental equipment of LiDAR pose determination

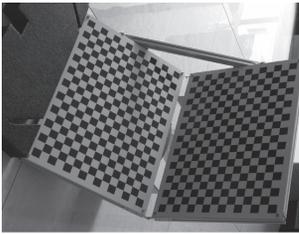


图 7 相机采集的 V 形标定板图像

Fig. 7 Image of the V shaped calibration pattern captured by the camera

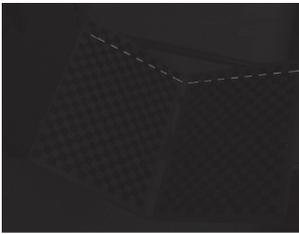


图 8 标定板上的激光条图像

Fig. 8 Image of the laser lines on the calibration pattern

达光心)坐标和坐标轴单位方向向量,再将这些数据作为样本,应用本文第 2 节方法估计雷达坐标系与转台旋转角度的函数关系。由于不知道准确值,本文采用对比 87 个位置的函数计算结果与样本的偏差来评价函数估计效果。雷达光心的距离偏差及两个坐标轴的角度偏差结果如表 1 所示。可见根据模型计算的结果与样本具有较高的一致性,说明函数拟合效果比较好,同时也说明本文提出的雷达坐标系计算方法比较可靠,具有较高的精度。

表 1 雷达坐标系估计结果与样本的偏差  
**Table 1 Errors between the estimated coordinates and the samples**

	雷达光心/mm	z 轴/(°)	x 轴/(°)
平均误差	1.12	0.203	0.662
最大误差	2.72	0.455	1.580

实验中用于计算的计算机的 CPU 型号为 i5-3210,主频为 2.5 G,利用 OpenCV 3.4.15,采用 C++编程,计算总耗时为 7 s。考虑到实际应用时,激光雷达的位姿函数估计一般都是在实际测量前完成的,离线标定对算法的实时性要求不高,因此本文算法的耗时水平能够接受。

### 3.2 目标尺寸测量实验

为进一步验证本文提出的算法的精确性,利用转台搭载 2D 激光雷达对真实目标的尺寸进行扫描测量实验。实验装置如图 9 所示,其中转台与激光雷达型号与 3.1 节实验相同;目标选用位于雷达前方约 1.5 m 处的铝质圆盘状目标,圆盘直径的准确值为 140 mm。



图 9 目标尺寸测量实验装置

Fig. 9 Experimental equipment for object size measurement

控制转台转动扫描目标区域,转台的旋转角度间隔为 0.05°;利用 3.1 节实验结果,将从雷达获取的 2D 扫描点坐标转换到相机坐标系构成 3D 点云;根据点云提取圆盘轮廓圆,再以轮廓圆的直径作为圆盘直径的测量结果。重复以上扫描和测量过程 10 次,每次圆盘相对于转台的位置和倾斜角度均不同。图 10 显示了其中 1 次实验中获取的圆盘点云图,由图可见恢复出的 3D 点云总体上能体现出目标的几何形状,但激光雷达在对目标边缘进行深度扫描时容易出现较严重的失真。表 2 显示了 10 次测量的结果,可见 10 次测量的平均值较真实值小,这是由于激光雷达的角分辨率有限导致部分边缘点在扫描过程中被错过引起的;测量的平均误差为 2.77 mm,考虑到在对 1.5 m 远处的目标扫描时由于激光雷达的角分辨率导致的相邻扫描点间距约为 2.2 mm,取得以上测量结果能够令人满意,也再次证明了本文位姿估计方法的精确性。

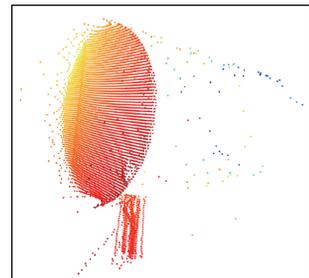


图 10 一次测量实验中生成的目标点云

Fig. 10 Object's point cloud generated in one experiment

表 2 目标尺寸测量实验结果

Table 2 Experimental results of object size measurement

实验次数	直径/mm	误差/mm
1	137.12	2.88
2	135.80	4.20
3	134.89	5.11
4	142.63	2.63
5	138.48	1.52
6	135.64	4.36
7	141.57	1.57
8	136.87	3.13
9	139.81	0.19
10	142.08	2.08
均值	138.49	2.77

## 4 结 论

本文提出一种安装在单轴转台上的 2D 激光雷达的位姿估计方法,该方法利用可见光相机和 V 形棋盘格标定板,通过拍摄一幅雷达投射到标定板的激光条图像,同时采集一次雷达样本点信息,确定雷达坐标系与相机坐标系间的关系;通过控制转台旋转 3 次或以上,确定雷达坐标系原点和坐标轴方向关于转台旋转角度的函数,实验表明该方法精度较高。该方法为应用单轴转台搭载 2D 激光雷达进行环境的 3D 扫描以及目标的测量或定位提供了保障。与前人提出的方法相比,该方法要求激光雷达的光条可成像,因此能利用更多的信息,有利于提高位姿估计的精度,考虑到多数激光雷达采用波长为 905 nm 或以下的红外光或可见光,能够被可见光相机感光,因此该方法对于以上波长范围的 2D 激光雷达均适用。

## 参考文献

- [ 1 ] 尚涛,贺会超,王昕,等. 二维激光雷达实现三维成像的算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(1): 91-95.
- SHANG T, HE H CH, WANG X, et al. Algorithm research on realizing three-dimensional imaging using two-dimensional laser radar [ J ]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(1): 91-95.
- [ 2 ] 李树青,邢鑫龙,林靖宇. 一种三维激光雷达系统标定方法[J]. 激光与红外, 2022, 52(2): 182-187.
- LI SH Q, XING X L, LIN J Y. A calibration method for 3D lidar system[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(2): 182-187.
- [ 3 ] 冯明驰,高小倩,汪静姝,等. 基于立体视觉与激光雷达的车辆目标外形位置融合算法研究[J]. 仪器仪

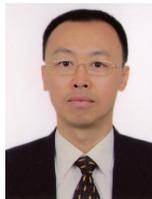
表学报, 2021, 42(10): 210-220.

FENG M CH, GAO X Q, WANG J SH, et al. Research on the fusion algorithm of vehicle object shape-position based on stereo vision and lidar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 210-220.

- [ 4 ] 张浩,左杭,刘宝华. 视觉与二维激光雷达的目标检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 79-86.
- ZHANG H, ZUO H, LIU B H. Target detection method for visual and 2D laser radar[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 79-86.
- [ 5 ] 李研芳,黄影平. 基于激光雷达和相机融合的目标检测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 112-117.
- LI Y F, HUANG Y P. Target detection based on the fusion of lidar and camera[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(5): 112-117.
- [ 6 ] ITAMI F, YAMAZAKI T. An improved method for the calibration of a 2D LiDAR with respect to a camera by using a checkerboard target[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14): 7906-7917.
- [ 7 ] VASCONCELOS F, BARRETO J P, NUNES U. A minimal solution for the extrinsic calibration of a camera and a laser-rangefinder [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2097-2107.
- [ 8 ] 彭梦,蔡自兴. 基于多约束误差函数的 2 维激光雷达和摄像机标定方法[J]. 机器人, 2014, 36(6): 662-667, 675.
- PENG M, CAI Z X. A calibration method of a camera and 2D Laser radar based on multi-constraint error function[J]. Robot, 2014, 36(6): 662-667, 675.
- [ 9 ] 彭梦,陈白帆,邓作杰,等. 2D 激光雷达和摄像机最小解标定的多解筛选及参数优化[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 89-97.
- PENG M, CHEN B F, DENG Z J, et al. Multi solution selection and parameter optimization for minimum solution calibration of 2D laser radar and camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 89-97.
- [ 10 ] ZHOU L. A new minimal solution for the extrinsic calibration of a 2D LiDAR and a camera using three plane-line correspondences [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(2): 442-454.
- [ 11 ] 祝飞,范佳,黄玉春,等. 融合多种棋盘格约束的面阵相机和线激光外参标定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1524-1529, 1537.
- ZHU F, FAN J, HUANG Y CH, et al. Extrinsic calibration of camera and 2D laser-rangefinder with

- various chessboard constrains [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(10): 1524-1529,1537.
- [12] ZHOU L, DENG Z. A new algorithm for the establishing data association between a camera and a 2-D LiDAR[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2014, 19(3): 314-322.
- [13] DONG W, ISLER V. A novel method for the extrinsic calibration of a 2D laser rangefinder and a camera [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(10): 4200-4211.
- [14] 董方新, 蔡军, 解杨敏. 立体视觉和三维激光系统的联合标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(10): 2589-2596.  
DONG F X, CAI J, XIE Y M. Joint calibration method for stereo vision system and 3D laser system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(10): 2589-2596.
- [15] 黄志清, 苏毅, 王庆文, 等. 二维激光雷达与可见光相机外参标定方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9): 121-129.  
HUANG ZH Q, SU Y, WANG Q W, et al. Research on extrinsic parameter calibration method of 2D laser rangefinder (LRF) and visible light camera[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9): 121-129.
- [16] NARODITSKY O, PATTERSON A, DANILIDIS K. Automatic alignment of a camera with a line scan lidar system[C]. *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 2011: 3429-3434.
- [17] GUO C X, ROUMELIOTIS S I. An analytical least-squares solution to the line scan LIDAR-camera extrinsic calibration problem[C]. *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 2013:2943-2948.
- [18] 杨超, 李天剑, 胡欢, 等. 基于非线性优化的激光雷达在线标定算法[J]. *计算机工程与设计*, 2021, 42(7): 1919-1925.  
YANG CH, LI T J, HU H, et al. Online lidar calibration algorithm based on nonlinear optimization[J]. *Computer Engineering and Design*, 2021, 42(7): 1919-1925.
- [19] 刘今越, 唐旭, 贾晓辉, 等. 三维激光雷达-相机间外参的高效标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(11): 64-72.  
LIU J Y, TANG X, JIA X H, et al. High efficient extrinsic parameter calibration method of 3D LiDAR-camera system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(11): 64-72.
- [20] 姚文韬, 沈春锋, 董文生. 一种自适应摄像机与激光雷达联合标定算法[J]. *控制工程*, 2017, 24(S0): 75-79.  
YAO W T, SHEN CH F, DONG W SH. An adaptive camera and lidar joint calibration algorithm[J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(S0): 75-79.

### 作者简介



刘昶(通信作者), 1992年和1995年于南开大学获学士和硕士学位, 2012年于中国科学院沈阳自动化所获得博士学位, 现为沈阳理工大学副教授, 主要研究方向为机器视觉和智能系统。

E-mail: syliuch@126.com

**Liu Chang** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree in 1992 and 1995 from Nankai University, received his Ph. D. degree in 2012 from Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Now he is an associate professor at Shenyang Ligong University. His main research interests include machine vision and intelligent system.