

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.018

无人地面平台多传感器的联合外标定方法

骆云志, 张春华, 吕卫强, 周建平, 王铃, 赵永滨, 李健, 李珏颖

(中国兵器工业第五八研究所军品部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对现有的传感器标定方法的不足, 提出一种采用 3D 标定物的无人地面平台多传感器联合外标定方法。在参考和借鉴国内外学者的智能移动机器人传感器标定研究成果的基础上, 建立了无人地面平台和多传感器坐标系; 并从 3D 标定物、多层激光测距仪的外标定、多层激光测距仪和 CCD 摄像机的联合外标定、坐标系之间的齐次变换和 L-M 非线性最优算法等几个方面论述多传感器的外标定方法和步骤; 对标定结果进行了验证和误差分析。现该方法已经成功应用于中型无人地面平台项目。应用结果表明: 该方法能修正各传感器的安装位姿误差, 保证标定后的各传感器的测量精度和目标(障碍物)在平台坐标系的一致性。

关键词: 无人地面平台; 多层激光测距仪外标定; 多传感器联合外标定; L-M 算法

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** B

Integration Extrinsic Calibration Algorithm of Unmanned Ground Platform Multi-Sensor

Luo Yunzhi, Zhang Chunhua, Lyu Weiqiang, Zhou Jianping, Wang Qian, Zhao Yongbin, Li Jian, Li Jueying
(Department of Military Products, No. 58 Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the shortcoming of current sensor calibration algorithm, introduce the integration extrinsic calibration algorithm of unmanned ground platform multi-sensor based on 3D calibration item. Based on research of foreign and domestic intelligence mobile robot sensor calibration, establish the unmanned ground platform and multi-sensor coordinate system. Introduce the multi-sensor extrinsic calibration method and its steps based on 3D calibration item, extrinsic calibration of multi-layer laser range finder and CCD camera, homogeneous transformation among coordinate system, and L-M nonlinear optimum algorithm. Carry out validation and error analysis of calibration. The method is successfully used in middle-size unmanned ground platform project. The application results show that the method can correct the installation position error of each sensor, and ensure the consistency of calibrated sensor measurement accuracy and object (obstacle) in platform coordinates system.

Key words: unmanned ground platform; multi-layer laser range finder extrinsic calibration; integration extrinsic calibration of multi-sensor; L-M algorithm

0 引言

当无人地面平台在结构化和非结构化的未知环境中行驶时, 需使用多传感器系统获得无人地面平台周围目标(障碍物)和前方行驶区域 ROI(regions of interest, ROI)的环境描述, 检测、分类和定位各种自然和人造目标特征, 以确认无人地面平台定位, 验证全局路径规划区在平台开始运动前所作的假定, 收集必不可少的重规划信息。

多传感器系统一般由 2 台多层激光测距仪和 1 台 CCD 摄像机组成, 为了得到目标(动态/静态障碍物)在平台坐标系中的距离、方位、大小和运动速度, 就必须将传感器坐标系中的目标数据转换到平台坐标系, 为此必须确定传感器坐标系和平台坐标系间的几何关系, 即确定传感器坐标系在平台坐标系中的位姿, 将传感器坐标系中的目标数据转换到平台坐标系, 这样才能对多传感器信息进行融合。

影响多层激光测距仪的测量精度和重复测量精度的因素有: 传感器安装位姿、目标反射率和测量距离等, 其中安装位姿只有通过外标定才能解决其坐标系和平台坐标系之间的几何关系。

影响摄像机的测量精度和重复测量精度的因素有: 摄像机的内部几何结构、镜头光学特性(透视误差和镜头畸变)、光照和安装位姿等, 其中安装位姿只有通过外标定才能解决其坐标系和平台坐标系之间的几何关系。

综上所述, 传感器外标定是传感器在无人地面平台坐标空间配准的基础, 标定的效果直接影响平台的自动驾驶性能; 因此, 传感器外标定是发展无人地面平台技术需首先解决的问题之一。

现有的传感器标定方法主要集中于对单一传感器进行标定, 如摄像机的标定^[1-22]以及基于激光雷达的摄像头标定方法(专利申请号: 200810042152)

收稿日期: 2012-06-13; 修回日期: 2012-07-06

作者简介: 骆云志(1971—), 男, 四川人, 研究员级高级工程师, 从事智能移动机器人技术研究。

等。单一标定方法对多种传感器分别进行标定往往需要设计多套标定方案, 制作多种标定物, 操作复杂, 而且还会带来多种传感器空间配准和目标难以在无人地面平台坐标系中形成一致描述等问题。为了能得到目标(障碍物)在无人地面平台坐标系的一致描述, 需要进行多层激光测距仪和摄像机的联合外标定法研究。

多传感器系统外标定就是求取能描述多传感器相对于无人地面平台坐标系的三维位置和方向的外部参数, 主要标定方法分为: 传统标定法、自标定法和主动标定法。而传统标定法又分为: 线性法、非线性法和 Tsai 法。

不少国内外学者都在进行智能移动小车的多层激光测距仪和摄像机的外部联合标定研究。如“基于摄像机和三维激光雷达的外部参数标定方法及系统”(专利申请号: 200910235291), 它虽然实现了同时对摄像机和三维激光雷达的外部参数进行标定, 但计算复杂和精度不高, 对于需要快速标定和高精度的系统来说并不适用。国外的 Q.Zhang and R.Pless 和 R.Dupont, R.Keriven and P.Fuchs 分别于 2004 年和 2005 年使用一个平面模板对 1 台摄像机和 1 台单层激光测距仪进行外标定, 只标定了方位和位置^[23-24]。Sergio A.Rodriguez F., Vincent Fremont Philippe Bonnifait 于 2008 年发表了使用一个有黑色环, 环内通孔的平板标定物对 1 台多层激光测距仪和 1 台摄像机进行外标定^[25], 该方法能确定多层激光测距仪和摄像机之间的相对位置和方位, 但未完全解决多传感器坐标系和无人地面平台坐标系之间的相对姿态评估问题。

因此, 笔者使用同一 3D 标定物, 对多传感器系统中的 2 台多层激光测距仪和 1 台摄像机进行外标定评估, 能修正各传感器的安装位姿误差, 保证标定后的各传感器的测量精度, 得到目标(障碍物)在平台坐标系的一致描述。

1 多传感器配置、安装和坐标系的建立

1.1 无人地面平台多传感器配置和安装

1.1.1 无人地面平台多传感器配置

根据无人地面平台 ROI 的总体要求, 使用 2 台多层激光测距仪和 1 台 CCD 摄像机, 实现对无人地面平台正前方 ROI 的环境感知, 故要求 2 台多层激光测距仪和 1 台 CCD 摄像机的 FOV 合成的检测范围能覆盖整个平台前端。

1.1.2 多传感器中多层激光测距仪的安装

将 2 台多层激光测距仪按图 1 所示分别安装在平台前端左右两侧大灯处。

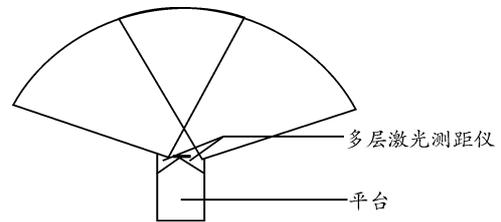


图 1 多层激光测距仪安装示意图

1) 多层激光测距仪的安装高度。

为了保证多层激光测距仪的光束中心与地面平行, 根据其工作原理, 在垂直方向(最低的扫描区域)向下倾斜角度为 $\theta=1.6^\circ$, 则有效探测距离(即死区检测距离) d 由安装高度 h_0 确定, 如图 2 所示。由图 2 可知, d 满足式 (1) 所示关系:

$$d = \frac{h_0}{\tan \theta} \tag{1}$$

当多层激光测距仪安装于 A 点时, 设备安装高度为 h_0' , 死区距离为 d_0' , 可检测到处于 X 点处的障碍物。当安装高度调至 B 点时, 高度为 h_0 , 检测死区距离为 d , 能检测到 Y 点处的障碍物。

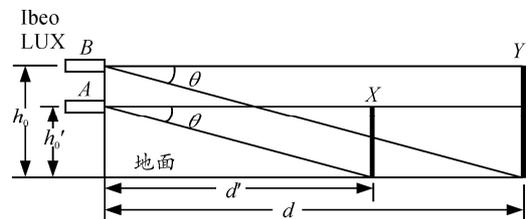


图 2 多层激光测距仪的检测死区与安装高度之间的关系

2) 多层激光测距仪的安装角度。

多层激光测距仪的安装角度就是其光轴与平台纵轴之间的夹角, 则安装角度如图 3 的 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 。

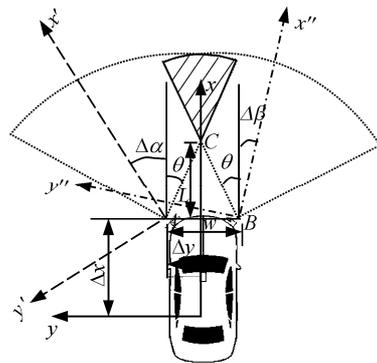


图 3 多层激光测距仪安装角度

1.1.3 多传感器系统中的 CCD 摄像机安装

多传感器系统中的 CCD 摄像机安装在无人地面平台小车挡风玻璃上部中央，位于中轴上。

1.2 无人地面平台和多传感器坐标系的建立

按照 DIN70000 标准建立平台和传感器坐标系，如图 4 所示。图 4 中：1 为安装在平台前端左侧的多层激光测距仪；2 为无人地面平台前轴；3 为无人地面平台；4 为无人地面平台后轴；5 为 CCD 摄像机；6 为安装在平台前端右侧的多层激光测距仪； $\Delta\alpha$ 为左侧多层激光测距仪坐标系 x_1 轴与无人地面平台坐标系 x 轴间的夹角(方位角)； $\Delta\beta$ 为右侧多层激光测距仪坐标系 x_2 轴与无人地面平台坐标系 x 轴间的夹角(方位角)； Δx_1 为 2 台多层激光测距仪坐标系原点在无人地面平台坐标系 x 轴上的偏移值； Δy_1 为左侧多层激光测距仪坐标系原点在无人地面平台坐标系 y 轴上的偏移值； Δy_2 为右侧多层激光测距仪坐标系原点在无人地面平台坐标系 y 轴上的偏移值； Δx_c 和 Δy_c 分别为摄像机坐标系原点在无人地面平台坐标系 x 轴和 y 轴上的偏移值。它们都可通过测量和设计确定。

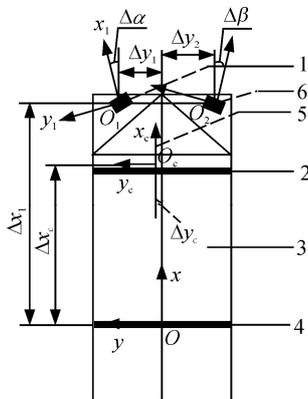


图 4 无人地面平台和多传感器坐标系

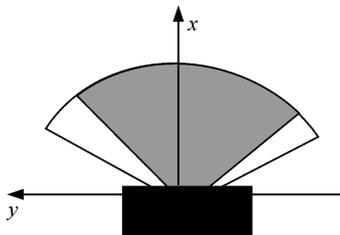


图 5 多层激光测距仪坐标系

将无人地面平台后轴作为平台坐标系的 y 轴，其方向指向左；后轴的中心点作为坐标系的原点；过原点作 y 轴的垂直线(平台的前进方向)，将这垂

直线作为 x 轴，其方向指向前。

多层激光测距仪坐标系建立如图 5 所示：以多层激光测距仪检测面几何中心作为坐标系原点；过原点作检测面的垂线作为 x 轴，其方向指向前；过原点作 x 轴的垂线，其方向指向左，作为 y 轴。

CCD 摄像机坐标系的建立和多层激光测距仪坐标系相同，其坐标系为 $x_c-O_c-y_c$ 。

2 系统模型、理论基础和相关定义

2.1 多传感器联合外标定的系统模型和理论基础

传感器坐标系中的点坐标为 $p^{\text{sensor}} = (x^{\text{sensor}}, y^{\text{sensor}}, z^{\text{sensor}}, 1)^T$ ，通过齐次变换矩阵 $H_{\text{sensor} \rightarrow \text{veh}} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 变换到车辆坐标系下的点 $p^{\text{veh}} = (x^{\text{veh}}, y^{\text{veh}}, z^{\text{veh}}, 1)^T$ ，可以用式 (2) 表示：

$$p^{\text{veh}} = H_{\text{sensor} \rightarrow \text{veh}} p^{\text{sensor}} \quad (2)$$

式 (2) 中，矩阵 $H_{\text{sensor} \rightarrow \text{veh}} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 定义为式 (3)

$$H_{\text{sensor} \rightarrow \text{veh}} = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式 (3) 中 $t = (t_x, t_y, t_z)^T$ 是传感器相对于车辆坐标系的安装位置偏移(平移矢量)， $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为旋转矩阵，定义为式 (4)

$$R = R_\psi R_\theta R_\phi \quad (4)$$

绕传感器坐标系 x 轴旋转的滚动角 ϕ 和相应的旋转矩阵 R_ϕ 定义为式 (5)

$$R_\phi = R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (5)$$

绕传感器坐标系 y 轴旋转的俯仰角 θ 和相应的旋转矩阵 R_θ 定义为式 (6)

$$R_\theta = R_y = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

绕传感器坐标系 z 轴旋转的偏航角 ψ 和相应的旋转矩阵 R_ψ 定义为式 (7)

$$R_\psi = R_z = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

由传感器坐标系到车辆坐标系的变换 $H_{\text{sensor} \rightarrow \text{veh}} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 如式 (2) 和式 (3) 所示，要求取它

就需要确定其 6 个自由度, 其中包括 3 个旋转角度和 3 个平移矢量。

假设各传感器的安装位置 (t_{ls}, t_{cam}) 已知, 即确定了 3 个平移矢量, 则标定过程简化为在无人地面平台坐标系下对姿态角度的标定。

2.2 多传感器联合外标定方法和标定物

2.2.1 多传感器联合外标定方法

虽然文献[26]指出 CCD 摄像机存在以下问题: 对称的径向失真或桶形失真、图像中心点偏移失真、成像面不平整失真和成像面内成像失真等, 但由于笔者采用的是 CCD 摄像机, 不存在产生对称的径向、桶形和图像中心点偏移失真等因素, 另外如引入过多的非线性参数, 不仅存在不稳定解, 还存在降低计算精度的问题^[27], 故笔者只对 CCD 摄像机的焦距和外部参数进行标定。

笔者所提出的多传感器联合外标定法是使用同一标定物, 采用齐次变换、线性和 L-M 算法^[28-29]先对配置在无人地面平台上的 2 台多层激光测距仪进行外标定, 再对多层激光测距仪和 CCD 摄像机进行联合外标定。

2.2.2 多传感器联合外标定物

采用 Albert Einstein 提出的标定物^[30]方法设计和制造了 3 个标定物, 如图 6~8 所示。



图 6 标定物 1

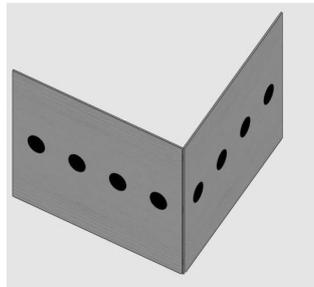


图 7 标定物 2

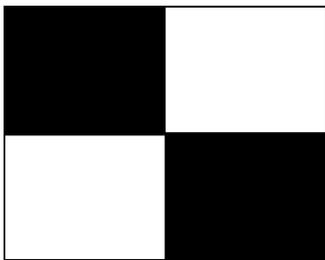


图 8 标定物 3

标定物 1 用于对多层激光测距仪的俯仰角和滚动角的外标定, 标定物 2 用于对多层激光测距仪的

方位角的外标定。对多层激光测距仪的外标定完成后, 标定物 2 和标定物 3 用于多层激光测距仪和 CCD 摄像机的联合外标定。

3 多层激光测距仪的外标定方法和步骤

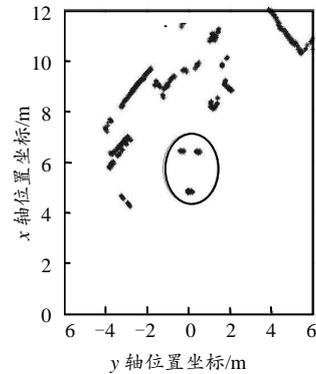
2 台多层激光测距仪外标定方法相同, 每一台多层激光测距仪外标定都分 2 步进行, 第一步对滚动角 ϕ 和俯仰角 θ 进行标定; 第二步再对方位角 ψ_{ls} 进行标定。

3.1 对多层激光测距仪的滚动角 ϕ 和俯仰角 θ 进行外标定

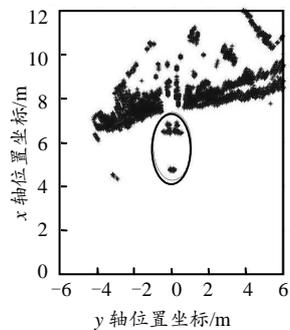
以安装在平台左侧的多层激光测距仪的外标定为例进行论述。

3.1.1 采集多层激光测距仪原始测量数据

将标定物 1 放置在平台左侧的多层激光测距仪坐标系的 $x_1-O_1-y_1$ 平面上, 采集多组多层激光测距仪测量标定物 1 的原始测量数据, 并在 Matlab 中显示, 如图 9 所示。图 9 中, 圆弧区对应于标定物 1 的原始测量数据, 用回归法进行处理可得图 10 所示的测量标定物 1 的 p_a^{ls} 和 p_b^{ls} 结果。

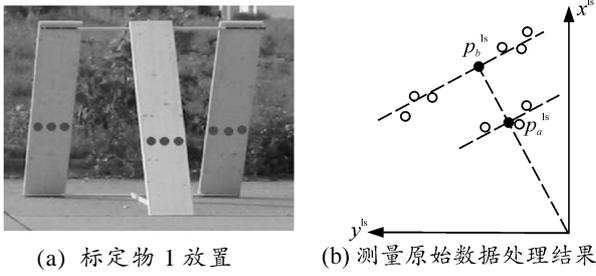


(a) 标定物 1 的第 4 层扫描数据显示

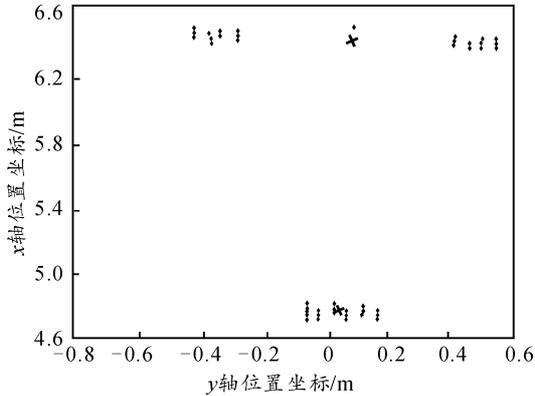


(b) 标定物 1 的第 3 层扫描数据显示

图 9 多层激光测距仪测量标定物 1 的原始测量数据显示



(a) 标定物 1 放置 (b) 测量原始数据处理结果



(c) 实测值 (图中“x”为求出的回归点)

图 10 测量标定物 1 原始数据的预处理结果

3.1.2 计算和标定 ϕ 和 θ 角

为了标定 ϕ 和 θ 角, 假设一个虚拟坐标系 C_{xy}^* , 它的 $x-y$ 平面平行于平台坐标系 C_{veh} 的 $x-y$ 平面 V_{veh} 。虚拟坐标系 C_{xy}^* 的原点与多层激光测距仪坐标系 C_{ls} 的原点重合。多层激光测距仪坐标系下的一点 p^{ls} 通过旋转矩阵 $R_{ls \rightarrow ls^*}(\theta_{ls}, \phi_{ls}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 变换到虚拟坐标系 C_{xy}^* 下, 如式 (8) 所示:

$$p^{ls^*} = R_{ls \rightarrow ls^*}(\theta_{ls}, \phi_{ls}) p^{ls} \quad (8)$$

根据图 11 可知, 图 10 中的 p_a^{ls} 和 p_b^{ls} 连线与平台坐标系 C_{veh} 的 $x-y$ 平面间的夹角 α_c 与标定物 1 尺寸和多层激光测距仪对标定物 1 的测量值之间的关系, α_c 可由式 (9) 计算。

$$\alpha_c = \arctan\left(\frac{bc + \sqrt{1-c^2+b^2}}{1+b^2}, -\frac{b(bc + \sqrt{1-c^2+b^2})}{1+b^2} + c\right) \quad (9)$$

$$\text{式中: } b = -\frac{w_c(\|p_a^{ls}\| + \|p_b^{ls}\|)}{2h_c(\|p_b^{ls}\| - \|p_a^{ls}\|)}$$

$$c = \frac{w_c(h_c - t_{z,ls})}{h_c(\|p_b^{ls}\| - \|p_a^{ls}\|)}$$

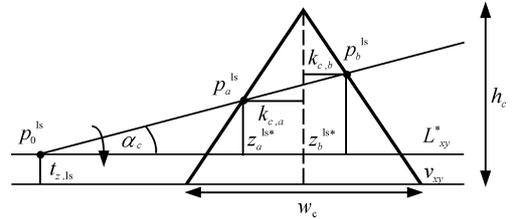


图 11 α_c 与标定物 1 尺寸和其测量值之间的关系

由图 11 可看出, $z_a^{ls^*}$ 和 $z_b^{ls^*}$ 分别为 p_a^{ls} 和 p_b^{ls} 点在虚拟坐标系 C_{xy}^* 下的 z 坐标, $z_a^{ls^*}$ 和 $z_b^{ls^*}$ 与角 α_c 间的关系由式 (10) 和式 (11) 表示:

$$z_a^{ls^*} = -|p_a^{ls}| \sin \alpha_c \quad (10)$$

$$z_b^{ls^*} = -|p_b^{ls}| \sin \alpha_c \quad (11)$$

当点 p_a^{ls} 在多层激光测距仪坐标系下的坐标值是已知时, 式 (8) 就只有 4 个未知量, 如式 (12)。

$$\hat{p}_a^{ls}(\theta_{ls}, \phi_{ls}, x_a^{ls^*}, y_a^{ls^*}) = R'_{ls \rightarrow ls^*}(\theta_{ls}, \phi_{ls}) p_a^{ls^*}(x_a^{ls^*}, y_a^{ls^*}) \quad (12)$$

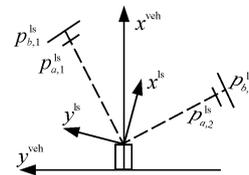


图 12 标定物 1 在多层激光测距仪坐标系的放置位置

将标定物 1 按图 12 再放置在多层激光测距仪坐标系 x 轴右侧, 此时可按上述方法对此进行测量和计算。这样就满足了将式 (12) 求解变成一个最小二乘问题的条件: $N \geq 2$, 如式 (13) 所示; 同时有式 (14) 成立。

$$0 = \sum_{i=1}^N \|\hat{p}_{a,i}^{ls}(\theta_{ls}, \phi_{ls}, x_{a,i}^{ls^*}, y_{a,i}^{ls^*}) - p_{a,i}^{ls}\| \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ \sin \phi \sin \theta & \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \phi \sin \theta & \sin \phi & \cos \phi \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 & \sin \phi \sin \theta & \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi \\ 0 & 0 & 0 & -\cos \phi \sin \theta & \sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{a,1}^{ls^*} \\ y_{a,1}^{ls^*} \\ z_{a,1}^{ls^*} \\ x_{a,2}^{ls^*} \\ y_{a,2}^{ls^*} \\ z_{a,2}^{ls^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{a,1}^{ls} \\ y_{a,1}^{ls} \\ z_{a,1}^{ls} \\ x_{a,2}^{ls} \\ y_{a,2}^{ls} \\ z_{a,2}^{ls} \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式 (14) 可以得到 6 个方程和 6 个未知数 (未知数中包含 ϕ 和 θ), 其中可以通过测量得到 $p_{a,1}^{ls}(x_{a,1}^{ls}, y_{a,1}^{ls}, z_{a,1}^{ls})$ 、 $p_{a,2}^{ls}(x_{a,2}^{ls}, y_{a,2}^{ls}, z_{a,2}^{ls})$ 、 $z_{a,1}^{ls*}$ 和 $z_{a,2}^{ls*}$, 其余量为未知。对式 (14) 求最优解, 即可得到待估参数 ϕ 和 θ 角。当 $N \geq 2$ 时, 式 (14) 就变为 $3N$ 个方程和 $2(N+1)$ 个未知数的方程组求最优解问题, 即最小二乘问题。这种非线性的最优解问题可以用

$$\begin{cases} f_1(\theta, \phi, x_{a,1}^{ls*}, y_{b,1}^{ls*}, x_{a,2}^{ls*}, y_{b,2}^{ls*}) = \cos \theta \cdot x_{a,1}^{ls*} + \sin \theta \cdot z_{a,1}^{ls*} - x_{a,1}^{ls} \\ f_2(\theta, \phi, x_{a,1}^{ls*}, y_{b,1}^{ls*}, x_{a,2}^{ls*}, y_{b,2}^{ls*}) = \sin \theta \sin \phi \cdot x_{a,1}^{ls*} + \cos \phi \cdot y_{a,1}^{ls*} - \cos \theta \sin \phi \cdot z_{a,1}^{ls*} - y_{a,1}^{ls} \\ f_3(\theta, \phi, x_{a,1}^{ls*}, y_{b,1}^{ls*}, x_{a,2}^{ls*}, y_{b,2}^{ls*}) = -\cos \phi \sin \theta \cdot x_{a,1}^{ls*} + \sin \phi \cdot y_{a,1}^{ls*} + \cos \phi \cos \theta \cdot z_{a,1}^{ls*} - z_{a,1}^{ls} \\ f_4(\theta, \phi, x_{a,1}^{ls*}, y_{b,1}^{ls*}, x_{a,2}^{ls*}, y_{b,2}^{ls*}) = \cos \theta \cdot x_{a,2}^{ls*} + \sin \theta \cdot z_{a,2}^{ls*} - x_{a,2}^{ls} \\ f_5(\theta, \phi, x_{a,1}^{ls*}, y_{b,1}^{ls*}, x_{a,2}^{ls*}, y_{b,2}^{ls*}) = \sin \theta \sin \phi \cdot x_{a,2}^{ls*} + \cos \phi \cdot y_{a,2}^{ls*} - \cos \theta \sin \phi \cdot z_{a,2}^{ls*} - y_{a,2}^{ls} \\ f_6(\theta, \phi, x_{a,1}^{ls*}, y_{b,1}^{ls*}, x_{a,2}^{ls*}, y_{b,2}^{ls*}) = -\cos \phi \sin \theta \cdot x_{a,2}^{ls*} + \sin \phi \cdot y_{a,2}^{ls*} + \cos \phi \cos \theta \cdot z_{a,2}^{ls*} - z_{a,2}^{ls} \end{cases} \quad (15)$$

3.2 计算和标定方位角 ψ

当俯仰角 ϕ 和滚动角 θ 完成了标定评估后, 就可进行方位角标定。为了解决跟踪目标的位置精度和速度对平台坐标系 C_{veh} 的方位角精度影响, 可构建一个图 13(a) 所示的标定物 2。将标定物 2 按照图 14 放置在多层激光测距仪坐标系的前方, 且保证多层激光测距仪坐标系原点和标定物 2 的两侧面相交线间的连线与平台坐标系的 x 轴平行。

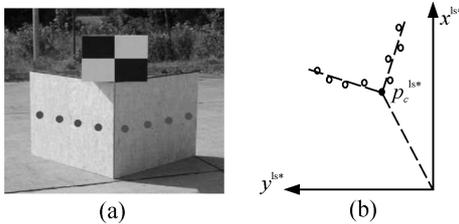


图 13 标定物 2 及对多层激光测距仪所测两条拟合直线

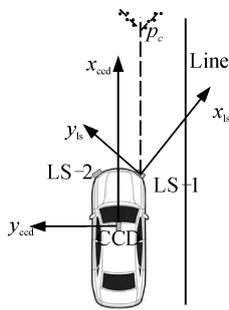
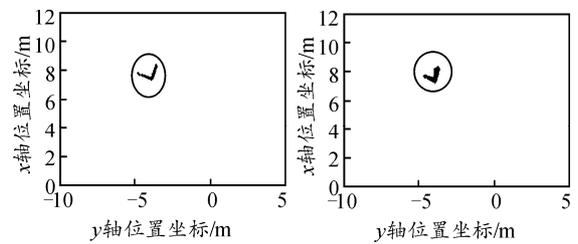


图 14 多层激光测距仪方位角的标定

利用 3.1 节中的多层激光测距仪滚动角 ϕ 和俯仰角 θ 的标定结果, 对采集标定物 2 的原始数据进行预处理, 如图 15 所示那样的虚拟坐标系 C_{xy}^* 下的结果。

L-M 算法^[29]得到解决。因为 L-M 算法求出的最优解为局部的最优解而非全局最优解, 所以当 ϕ 和 θ 不是特别大时, 可以将 ϕ_{ls} 和 θ_{ls} 的初值设为 $0(\phi_{ls} = \theta_{ls} = 0)$, $p_{a,i}^{ls*} = \hat{p}_{a,i}^{ls} = p_{a,i}^{ls}$ 。

将式 (14) 转化为方程组式 (15), 使用 L-M 算法^[29]就可求解方程式 (15), 得到 ϕ 和 θ 角。

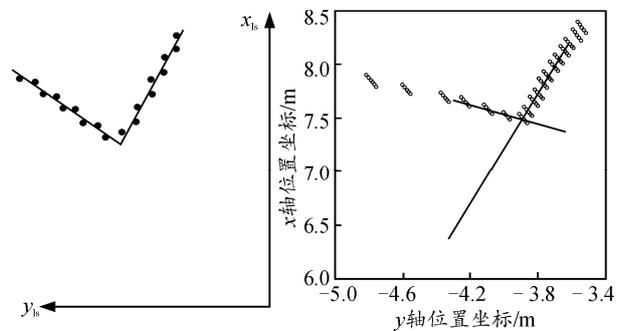


(a) 标定物 2 的原始数据 (b) 经过预处理后的数据

图 15 检测标定物 2 的原始数据和预处理结果

为了减少随机误差, 可采用多次测量求平均的方法。即对左右 2 个多层激光测距仪分别采集 3 组不同位置的数据进行均值计算, 对图 15(a) 中的数据, 按照最小二乘拟合直线得到图 16(b) 所示的 2 条回归直线, 其交点为 $p_c^{ls*}(x_c^{ls*}, y_c^{ls*})$, 则可使用式 (16) 计算方位角。

$$\psi = \arctan\left(\frac{y_c^{ls*}}{x_c^{ls*}}\right) \quad (16)$$



(a) 用最小二乘拟合直线示意图 (b) 用最小二乘法拟合直线的交点

图 16 图 15 所示数据用最小二乘拟合结果

4 多层激光测距仪与 CCD 摄像机联合外标定

4.1 CCD 摄像机小孔成像模型

为了定量地说明 CCD 摄像机成像模型，笔者建立如图 17 所示的 CCD 摄像机坐标系 C_{cam} 、图像平面坐标系 C_{img} 和像素坐标系 (u, v) ，还建立一个和多层激光测距仪一样的摄像机虚拟坐标系 C_{cam^*} 。虚拟坐标系 C_{cam^*} 的 $x-y$ 平面平行于平台坐标系 C_{veh} 的 $x-y$ 平面，且 z 轴相互平行，虚拟坐标系 C_{cam^*} 的原点与 CCD 摄像机坐标系 C_{cam} 的原点重合。采用式 (17) 齐次变换 $H_{cam^* \rightarrow cam}$ ，将虚拟坐标系中的坐标值变换至 CCD 摄像机坐标系中。

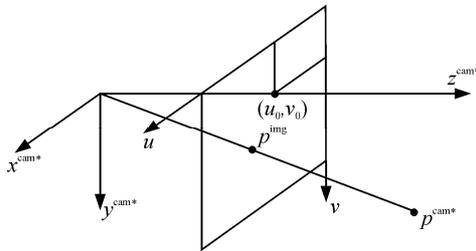


图 17 摄像机坐标系

$$H_{cam^* \rightarrow cam} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

用 $H_{cam^* \rightarrow img}$ 将 C_{cam^*} 上的 p^{cam^*} 点映射到图像平面坐标系 C_{img} 上，其相应点 \tilde{p}^{img} 用式 (18) 表示：

$$\tilde{p}^{img} = H_{cam^* \rightarrow img} p^{cam^*} = \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{cam^*} \\ y^{cam^*} \\ z^{cam^*} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

4.2 多层激光测距仪、CCD 摄像机的联合外标定及焦距标定

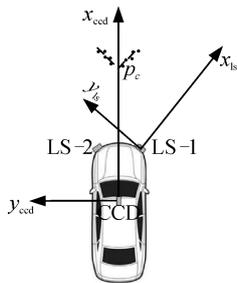


图 18 标定物 2、CCD 摄像机和多层激光测距放置

按图 18 所示放置标定物 2、CCD 摄像机和多层激光测距仪。

4.2.1 多层激光测距仪和 CCD 摄像机的联合外标定

笔者先将 CCD 摄像机和已标定的多层激光测距仪一起进行联合外标定，外标定参数是 CCD 摄像机相对于平台坐标系的方位 (θ, ϕ, φ) ，之后再标定焦距。

使用多层激光测距仪测量标定物 2，并对所采集的数据进行处理，求出标定物 2 的 2 条回归直线的交点 p^{ls} ，用式 (19) 变换到摄像机坐标系 C_{cam} 下相应的点 p^{cam} ：

$$p^{cam} = H_{ls \rightarrow cam} p^{ls} = H_{cam \rightarrow veh}^{-1} H_{ls \rightarrow veh} p^{ls} \quad (19)$$

由式 (19) 可求得标定物 3 棋盘格中点在 CCD 摄像机坐标系下的 $x-y$ 坐标，其中棋盘格中点在 CCD 摄像机坐标系 z 轴上的坐标值通过手工测量的方式得到。

多层激光测距仪已测得其坐标系下的标定物 2 的交点 $p^{ls} (x_{ls}, y_{ls})$ 值，将标定物 2 的已知高度作为 p^{ls} 的高度，这样就知道了标定物 2 和标定物 3 在平台坐标系上的位置，用齐次变换将 p^{ls} 点映射到 CCD 摄像机坐标系下，最终映射到像素坐标系下完成标定。整个过程如式 (20) 所示。

$$p^{ls} \rightarrow p^{cam^*} \rightarrow p^{cam} \rightarrow p^{uv} \quad (20)$$

式 (19) 中 p^{cam} 可以通过式 (21) 得到：

$$\begin{bmatrix} p^{cam} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(\phi, \theta, \varphi) p^{cam^*} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^{ls} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

式 (21) 中， $t = [t_x, t_y, t_z]^T$ 为从多层激光测距仪坐标系到 CCD 摄像机坐标系的已知平移矢量， $R(\phi, \theta, \varphi)$ 为从 CCD 摄像机虚拟坐标系到 CCD 摄像机坐标系的旋转矩阵。从 CCD 摄像机坐标系到像素坐标系的变换关系如式 (22)、式 (23) 和式 (24) 所示。

$$\begin{bmatrix} 1 \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{x_{cam}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cam} \\ y_{cam} \\ z_{cam} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ u_0 & 1/dy & 0 \\ v_0 & 0 & 1/dz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ u_0 & 1/dy & 0 \\ v_0 & 0 & 1/dz \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{x_{cam}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}(\phi, \theta, \varphi) \begin{bmatrix} x_{cam}^* \\ y_{cam}^* \\ z_{cam}^* \end{bmatrix} \quad (24)$$

式 (24) 中, (u_0, v_0) 为光轴在像素平面上的坐标, dy, dz 为成像平面上一个像素的物理尺寸, f 为 CCD 摄像机的焦距。

由于 $\mathbf{R}(\phi, \theta, \varphi)$ 表达式极其复杂, 采用等价替换将式 (24) 表达为式 (25)。

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ u_0 & 1/dy & 0 \\ v_0 & 0 & 1/dz \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{x_{cam}^i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}(\phi, \theta, \varphi) \quad (25)$$

将标定物 2 按图 19 那样放置, 可得到 3 组 \mathbf{T}_i , 利用替换后的表达式建立非线性方程组, 如式(26)所示。式 (26) 中, $\mathbf{T}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $\mathbf{0} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 分别表示 3×3 阶实矩阵和 3×3 阶零矩阵。这样就满足了 $N \geq 2$ 条件, 就可按照 L-M 算法^[29]解方程 (26), 可得到 CCD 摄像机的滚动角 ϕ , 俯仰角 θ 和方位角 φ , 这样就完成了 CCD 摄像机的外标定。

$$\begin{bmatrix} 1 \\ u_1 \\ v_1 \\ 1 \\ u_2 \\ v_2 \\ 1 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{T}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cam}^1 \\ y_{cam}^1 \\ z_{cam}^1 \\ x_{cam}^2 \\ y_{cam}^2 \\ z_{cam}^2 \\ x_{cam}^3 \\ y_{cam}^3 \\ z_{cam}^3 \end{bmatrix} \quad (26)$$

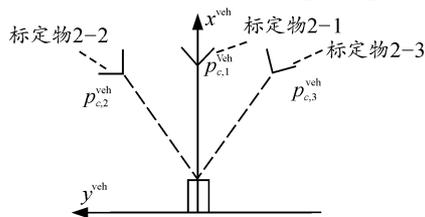


图 19 标定物 2 放置

4.2.2 CCD 摄像机焦距测量

采用图 20 所示原理测量焦距。图 20 中, h 为

标定物 2 的高度, d 为标定物到 CCD 摄像机的距离, f 为 CCD 摄像机的焦距, H 为标定物在成像平面上的物理尺寸, O 为 CCD 摄像机的光心。焦距的计算公式如式 (27) 所示。

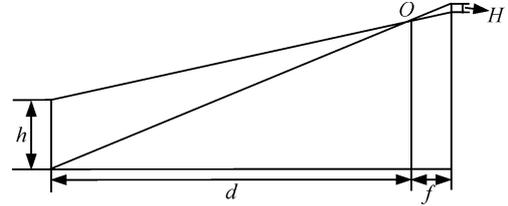


图 20 CCD 摄像机焦距测量原理图

$$f = \frac{d}{h} \times H = \frac{d}{h} \times n \times \frac{h_{CCD}}{H_{CCD}} \quad (27)$$

式 (27) 中, n 为标定物在像素平面上所成像像素的个数, h_{CCD} 为 CCD 摄像机成像平面的高度 (1/3 英寸 CCD 摄像机的高度尺寸为 3.6 mm), H_{CCD} 为图像分辨率中的高度信息 (标准 PAL 制式的图像高度为 576 个像素)。此处采用 1/3 英寸 CCD 摄像机和标准 PAL 制式的图像输出, 因此可以将式 (27) 改写为式 (28) 的形式。

$$f = c \cdot \frac{n \times d}{h} \quad c = 0.0063 (\text{mm/pixel}) \quad (28)$$

5 验证和误差分析

5.1 多层激光测距仪外标定验证和误差分析

笔者分别对安装在平台前端左右两侧的多层激光测距仪进行了各 3 组原始数据采集和处理, 用 L-M 算法^[29]解方程式 (15), 得到表 1 所示的结果。其中点 $(p_{a,1}, p_{b,1})$ 、 $(p_{a,2}, p_{b,2})$ 和 $(p_{a,3}, p_{b,3})$ 为安装在平台前端左侧的多层激光测距仪所测量的数据点, 点 $(p_{a,4}, p_{b,4})$ 、 $(p_{a,5}, p_{b,5})$ 和 $(p_{a,6}, p_{b,6})$ 为安装在平台前端右侧的多层激光测距仪所测量的数据点。

由表 1 可以看出, 当每次使用两点采用非线性最小二乘法进行求解时, 所有方程的最大距离误差为 0.002 3 m。

每次使用两点对滚动角 ϕ 角和俯仰角 θ 进行标定的结果如表 2 所示。采用加权平均法得到滚动角与俯仰角的最终标定结果。左侧多层激光测距仪的滚动角 $\overline{\phi}_L$ 和俯仰角 $\overline{\theta}_L$ 分别为 0.7773° 和 1.3961° 。

右侧多层激光测距仪的滚动角 $\overline{\phi}_R$ 和俯仰角 $\overline{\theta}_R$ 分别为 -2.0448° 和 1.6158° 。

表 1 误差分析

m

方程	各测点相应的坐标值					
	$(P_{a,1}, P_{b,1})$	$(P_{a,2}, P_{b,2})$	$(P_{a,3}, P_{b,3})$	$(P_{a,4}, P_{b,4})$	$(P_{a,5}, P_{b,5})$	$(P_{a,6}, P_{b,6})$
f_1	7.043 4e-006	2.436 4e-005	2.679 5e-005	9.893 9e-005	6.890 1e-005	9.627 3e-005
f_2	7.029 7e-005	6.324 3e-005	5.488 8e-005	1.960 1e-005	5.214 4e-005	1.466 5e-005
f_3	0.002 3	0.001 5	0.001 4	1.996 7e-005	6.821 9e-004	0.001 5
f_4	1.044 8e-004	1.936 1e-005	9.544 7e-005	5.338 1e-005	9.901 5e-005	6.536 4e-005
f_5	1.126 5e-005	1.000 9e-004	6.187 0e-005	3.308 3e-005	3.418 7e-006	1.558 7e-005
f_6	0.001 8	0.001 2	0.001 1	1.579 8e-005	5.377 0e-004	0.001 3

注：坐标点为实测点，数值与表 2 中的点相对应。

表 2 滚动角 ϕ 角和俯仰角 θ 角标定结果

坐标点/m	$\phi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$
$p_{a,1}(5.508\ 8, -0.898\ 7, 0.080\ 0)$	0.126 1	2.343 4
$p_{b,1}(7.206\ 5, -1.080\ 1, 0.100\ 0)$		
$p_{a,2}(7.434\ 6, 2.669\ 6, 0.110\ 0)$	-2.670 0	1.174 6
$p_{b,2}(9.046\ 5, 3.266\ 3, 0.131\ 5)$		
$p_{a,3}(6.064\ 7, 1.195\ 0, 0.090\ 0)$	-3.592 4	1.329 3
$p_{b,3}(7.731\ 7, 1.393\ 1, 0.110\ 0)$		
$p_{a,4}(4.833\ 9, -0.033\ 5, 0.135\ 7)$	0.200 5	2.011 1
$p_{b,4}(6.409\ 0, -0.056\ 2, 0.180\ 0)$		
$p_{a,5}(5.272\ 0, -2.330\ 6, 0.160\ 0)$	1.357 9	1.237 6
$p_{b,6}(6.672\ 9, -2.990\ 0, 0.201\ 5)$		
$p_{a,6}(6.249\ 4, -5.528\ 2, 0.230\ 2)$	0.773 5	0.939 7
$p_{b,6}(7.338\ 6, -6.528\ 7, 0.274\ 1)$		

组数据， p_4 、 p_5 和 p_6 为右侧多层激光测距仪测量的 3 组数据。

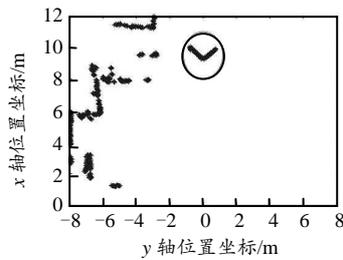
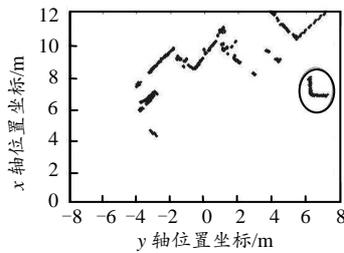
表 3 偏航角测量结果

坐标点	坐标值	偏航角/ $(^\circ)$
p_1	(11.241 1, -10.3180)	-42.548 3
p_2	(9.194 8, -8.4531)	-42.593 5
p_3	(6.797 5, -6.2578)	-42.632 6
p_4	(7.448 1, 3.8977)	27.623 6
p_5	(10.115 6, 5.3042)	27.670 8
p_6	(6.672 0, 3.4849)	27.578 7

对表 3 中左右侧的多层激光测距仪的方位角数据求平均值，得到最终的外标定结果为：左侧多层激光测距仪的方位角 $\phi_L = -42.5915^\circ$ ，右侧多层激光测距仪的方位角 $\phi_R = 27.6244^\circ$ 。

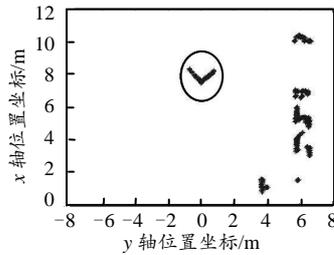
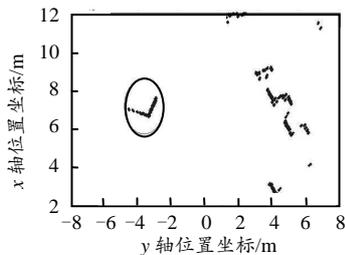
对多层激光测距仪外标定结果进行实例验证如图 21 和图 22 所示。

利用多次测量求平均的方法减小测量过程中随机误差。对左右 2 个多层激光测距仪分别采集 3 组不同位置的数据进行计算，如表 3 所示。其中点 p_1 、 p_2 和 p_3 为左侧多层激光测距仪测量的 3



(a) 显示标定前的多层激光测距仪坐标系下的标定物 2 (b) 显示标定后的平台坐标系下的标定物 2

图 21 左侧多层激光测距仪标定前后结果(椭圆内的图像为标定物 2)



(a) 显示标定前的多层激光测距仪坐标系下的标定物 2 (b) 显示标定后的平台坐标系下的标定物 2

图 22 右侧多层激光测距仪标定前后结果(椭圆内的图像为标定物 2)

5.2 CCD 摄像机外标定验证和误差分析

将标定物 2 和标定物 3 摆放于平台前端的不同位置,使用已标定了的多层激光测距仪测量其位置,并采集 CCD 摄像机的像素,它们的数据如表 4 所示。随机抽样表 4 中任意 3 点进行组合,并代入式 (26) 中。采用 L-M 算法^[29]解方程 (26),可得到 CCD 摄像机的滚动角 ϕ , 俯仰角 θ 和方位角 φ , 其误差如表 5 和外标定结果如表 6 所示。

表 4 多层激光测距仪和 CCD 摄像机的测量数据

坐标点	测量标定物 3 坐标值	像素坐标
p_1	(7.084 1, -0.072 0, 1.025)	(447, 249)
p_2	(5.435 9, -1.111 0, 1.025)	(619, 237)
p_3	(4.021 6, -0.380 2, 1.025)	(585, 211)
p_4	(4.861 0, 0.685 7, 1.025)	(105, 220)
p_5	(5.322 5, 0.036 1, 1.025)	(219, 227)

注: 表中坐标值为多层激光测距仪坐标系下的坐标值; 像素坐标系的原点位于图像的左上角。

表 5 CCD 摄像机外标定误差分析

方程	各测点相应的坐标像素误差					
	$p_1 \& p_2 \& p_3$	$p_1 \& p_2 \& p_4$	$p_1 \& p_2 \& p_5$	$p_1 \& p_3 \& p_4$	$p_1 \& p_3 \& p_5$	$p_1 \& p_4 \& p_5$
f_1	1.192 4	0.170 7	0.354 3	1.767 6	1.987 8	0.811 8
f_2	0.541 2	1.089 1	0.605 8	0.846 0	0.479 4	0.215 4
f_3	1.729 7	0.443 4	0.702 2	2.816 5	2.383 9	0.001 7
f_4	0.306 2	0.690 4	0.294 7	0.523 3	0.149 3	0.577 8
f_5	2.884 8	0.598 5	1.104 9	1.142 3	0.562 6	0.792 0
f_6	0.198 7	0.369 0	0.278 1	0.414 1	0.388 5	0.808 2

注: f_{2i-1} 表示 u_i 所对应的方程, f_{2i} 表示 v_i 所对应的方程。

表 6 CCD 摄像机外标定结果

实验组合	待标参数		
	滚动角 $\phi/(^\circ)$	俯仰角 $\theta/(^\circ)$	偏航角 $\varphi/(^\circ)$
$p_1 \& p_2 \& p_3$	1.666 7	0.927 0	1.025 9
$p_1 \& p_2 \& p_4$	0.748 3	1.157 1	1.052 2
$p_1 \& p_2 \& p_5$	1.032 0	1.088 9	1.052 9
$p_1 \& p_3 \& p_4$	0.749 6	1.146 6	0.932 4
$p_1 \& p_3 \& p_5$	1.069 7	1.081 4	0.932 4
$p_1 \& p_4 \& p_5$	0.554 3	1.077 4	0.996 1
最终标定结果	0.970 1	1.079 7	0.998 7

或多层外标定和与 CCD 摄像机的联合外标定, 多层激光测距仪能实时准确地映射在图像上, 得到目标的一致描述。

笔者所研究的无人地面平台多传感器安装、坐标系的建立、坐标系之间的齐次变换和 L-M 非线性最优算法等技术, 可作为研究智能移动机器人环境感知的参考。下一步, 笔者将继续研究具有传感器特性的标定物, 以及如何在多传感器的共同检测范围内准确地描述目标。

5.3 多传感器在平台空间的配准验证

在室外进行多传感器在平台空间的配准实验, 在平台前方 20 m 处放置一块 150 mm×600 mm 白色铁板和一个同向前行的行人, 多层激光测距仪和 CCD 摄像机在平台空间的配准如图 23 所示, 由图 23 可看出空间配准良好, 满足预测评估要求。



图 23 多层激光测距仪和 CCD 摄像机空间配准

6 结论

目前, 无人地面平台多传感器联合外标定方法已成功应用于我所的中型无人地面平台项目。实际应用结果证明: 该方法能使用 3D 标定物同时对多传感器进行外标定, 能实现多层激光测距仪的单层

参考文献:

- [1] 张伟华, 陈军. CCD 摄像机标定[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(2): 107-109.
- [2] Hennz Helmers, Markus Schellenberg. CMOS vs CCD sensors inspeckle interferometry[J]. Op tics & Laser Technology, 2003, 35(8): 587-595.
- [3] 井建辉, 张振东, 吴文琪. 摄像机标定在机器人视觉导航系统中的应用[C]//全国第 15 届计算机科学与技术应用学术会议, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 48-53.
- [4] Chen Shuyuan, TsaiWenhsiang. A systematic approach to analytic determination of camera parameters by line features[J]. Pat2ternRecognition, 1990, 23(8): 859-877.
- [5] 邱茂林, 马松德, 李毅. 计算机视觉中的摄像机标定综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55.
- [6] Wang Jianguhua, Shi Fanhuai, Zhang Jing, et al. A new calibration model of camera lens distortion[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(2): 607-615.
- [7] 朱常琳, 郭光辉. 摄像机与车体之间的坐标变化关系的研究[J]. 兰州铁道学院学报, 2001, 20(4): 17-20.