移动机器人中激光雷达测距测角标定方法

赵海鹏[1,2],杜玉红[1,2],丁 娟[3],赵 地[1,2],史屹君[3]

(1. 天津工业大学 机械工程学院,天津 300387; 2. 天津市现代机电装备重点实验室,天津 300387;
3. 天津市中环电子计算机有限公司,天津 300190)

摘 要:针对目前移动机器人对环境地图构建精度低的问题,分别提出了激光雷达测距、测角的标定方法。通过误差传播定律分析引起激光雷达的测距误差因素,可知激光雷达测距误差主要是由回波强度和测量距离引起的,推导出测距误差修正模型。通过分析激光雷达测角误差因素,针对机械扫描轴与几何旋转中心偏心引起的误差,提出了一种三角形标定方法,建立测角误差修正模型。根据激光雷达测距、测角误差修正模型修改移动机器人坐标转换系统。实验结果表明,测距标定使平面障碍物数据纵坐标差值的标准差提高了 30%~60%,接近物体真实几何特征;测角标定方法使障碍物数据的重合效果提高了 30%,标定方法提高了移动机器人地图构建的精度。

关键词:激光雷达; 标定方法; 回波强度; 修正模型

中图分类号:TP242.6 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0630002

LiDAR ranging angle measurement calibration method in mobile robot

Zhao Haipeng[1,2], Du Yuhong[1,2], Ding Juan[3], Zhao Di[1,2], Shi Yijun[3]

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Modern Mechanical and Electrical Equipment Technology, Tianjin 300387, China;
3. Tianjin Zhonghuan Electronic Computer Co., Ltd., Tianjin 300190, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current mobile robots have low accuracy for the construction of environmental maps, the calibration methods of ranging and angle measurement of LiDAR were proposed respectively. The error propagation law was used to analyze the ranging error factor of the LiDAR. It can be seen that the LiDAR ranging error was mainly caused by the echo intensity and the measuring distance, and the ranging error correction model was derived. By analyzing the error factors of LiDAR angle measurement, a triangulation calibration method was proposed for the error caused by the eccentricity of the mechanical scanning axis and the geometric rotation center, and the angle error correction model was established. The mobile robot coordinate conversion system was modified according to the LiDAR ranging and the angle correction model. The experimental results show that the standardization of the distance measurement increases the standard deviation of the longitudinal coordinate

收稿日期:2019-01-10; **修订日期**:2019-02-20

基金项目:国家自然科学基金(51205288);天津市自然科学基金(153CYBJC18400);天津市科技支撑计划重点项目(16YFZCSY00860);国家大学生创新创业训练项目(201810058042)

作者简介:赵海鹏(1992-),男,硕士生,主要从事机器人智能控制方面的研究。Email: haipeng_1227@163.com

导师简介:杜玉红(1974-),女,教授,博士,主要从事图像处理及模式识别、异纤检测方面的研究。Email: DYH202@163.com

difference of the plane obstacle data by 30%-60%, which is close to the real geometric feature of the object. The angle measurement method improves the coincidence effect of the obstacle data by 30%. The accuracy of map construction of mobile robots is improved using the calibration method.

Key words: LiDAR; calibration method; echo intensity; correction model

0 引 言

精确的环境地图构建是移动机器人领域的核心研究问题[1],是保证移动机器人在执行任务的过程中能够正确地进行路径规划的前提 [2]。移动机器人通过环境感知系统获取机器人周围环境信息从而进行地图构建[3-4]。由于二维激光雷达具有体积小、质量轻、实时性强、分辨率高等特点,被广泛应用在移动机器人的环境感知系统中[5]。

二维激光雷达在探测机器人周围环境过程中,由于受到设备制造误差和外界环境变化引起的误差等因素影响,获取的周围环境信息精度较低。为了获取准确的环境数据,国内外研究人员对激光雷达测距、测角的标定进行了大量的研究工作。项志宇等对激光雷达初始姿态误差和系统偏心误差建立了数学模型,在已知位置处放置一定宽度的木板进行数据采集,并采用最小二乘法做了系统标定[6]。Gielsdorf F 等采用若干平面度好的平板标定三维成像激光雷达,并利用 Gauss-Helmert 模型方法得到激光雷达内部参数的最优估计值[7]。Reshetyuk Y 等在室内或室外布置一定数量的目标,将目标理论位置与激光雷达测量值一一对应建立约束方程,同时解算系统的内、外参数[8]。于金霞等研究了测量距离和物体表面数据对测距精度的影响,通过混合像素测定的方法确定了激光雷达的角度分辨率[9]。Lindner M 等提出一种新的基于 TOF 测距深度相机关于强度的校准模型[10]。马浩等建立了激光雷达回波强度、测量距离与测量误差之间的关系,并建立测距误差修正模型[11]。

激光雷达获取环境信息误差主要分为测距和测角误差。现阶段激光雷达测距误差的标定主要根据实验平台确立约束方程并解算回波强度与测距误差、测量距离与测距误差的关系,从而建立误差修正模型[12-13]。上述方法中,第一种方法忽略了激光雷达测距误差会随着回波强度的不同而发生改变,第二种方法忽略了同一障碍物到激光雷达的距离不同引起回波强度的改变[14-15]。针对此问题文中提出了一种激光雷达测距误差的标定方法,首先确定激光雷达工作环境,消除由于时间引起的误差,建立回波强度与误差的拟合函数,考虑回波强度引起的误差从而建立测量距离与误差的拟合函数,建立测距误差修正模型[16-17]。目前在激光雷达测角误差的研究问题上,确定了激光雷达的角度分辨率,为后续测角的标定打下了良好的基础,在此基础上文中提出了一种激光雷达测角标定方法,通过旋转激光雷达利用不同角度测量同一障碍物,确定激光雷达几何旋转中心的位置,建立测角误差修正模型[18]。

1 移动机器人坐标转换数学模型

移动机器人通过传感器获取机器人自身位置、姿态和周围环境信息,可以在复杂环境面向目标位置进行路径规划并自主移动。在移动机器人地图构建过程中,使用全局坐标系、机器人坐标系和传感器坐标系,其中,全局坐标系是与大地固定连接的,在该坐标系中显示所有环境信息实际位置关系;机器人坐标系原点固定在机器人两轮轴线中心位置上,该坐标系 y 轴指向机器人前进方向;传感器坐标系固定在机器人前端,且传感器探测机器人周围环境通过极坐标的形式显示障碍物的位置信息。

全局坐标系 $X_MO_MY_M$、机器人坐标系 $X_RO_RY_R$ 和传感器坐标系 O_LX_L 的位置关系图如图 1 所示,机器人坐标系原点 O_R 在全局坐标系的坐标为 (x_r,y_r),坐

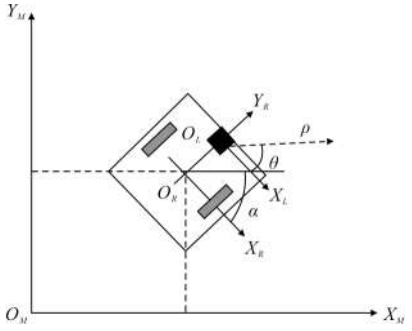

图 1 移动机器人坐标系统

Fig.1 Mobile robot coordinate system

标系间夹角为 α;传感器坐标系原点 O_L 在机器人坐标系的坐标为(x_s, y_s),坐标系间夹角为 0°。

若障碍物点 P 在传感器坐标系坐标为(ρ, θ),则 P 点在机器人坐标系下的坐标为:

$$^{R}P=\begin{bmatrix}\rho\cos\theta+x_s\\ \rho\sin\theta+y_s\end{bmatrix} \tag{1}$$

障碍物点 P 在全局坐标系下的坐标为:

$$^{M}P={}^{M}_{R}R\,{}^{R}P+{}^{M}P_{OR}\begin{bmatrix}\cos\alpha & -\sin\alpha\\ \sin\alpha & \cos\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\rho\cos\theta+x_s\\ \rho\sin\theta+y_s\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}x_r\\ y_r\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中:$^{M}_{R}R$ 为机器人坐标系到全局坐标系的旋转矩阵;$^{M}P_{OR}$ 为机器人坐标系原点 O_R 在全局坐标系下的坐标。通过该坐标转换系统完成机器人周围环境全局地图的构建。

2 误差修正模型的建立

2.1 测距误差修正模型

激光雷达在移动机器人应用中采用飞行时间法测距,测距公式如下:

$$L=\frac{1}{2}ct=\frac{c}{2n}NT_0 \tag{3}$$

式中:t 为激光束往返时间;c 为激光束在真空中传播的速度;n 为大气折射率;N 为激光束往返过程中脉冲总数;T_0 为激光束脉冲宽度。

激光雷达通过内部定时器记录激光束的往返时间 t,从而得到距离 L。影响 t 的因素较多,有零位误差、时间测量误差、时间延迟误差和回波强度误差等。由于折射率 n 改变引起的误差只是毫米级,所以忽略不计。影响 N、T_0 的因素是由激光雷达测量距离引起的。

根据误差传播定律,对公式(3)求全微分得:

$$\Delta L=\frac{1}{2n}NT_0\Delta c-\frac{c}{2n^2}NT_0\Delta n+\frac{c}{2n}T_0\Delta N+\frac{c}{2n}N\Delta T_0=$$
$$L\left(\frac{1}{c}\Delta c-\frac{1}{n}\Delta n+\frac{1}{N}\Delta N+\frac{1}{T_0}\Delta T_0\right) \tag{4}$$

从公式(4)可知 c、n、N、T_0 这几项对脉冲式激光测距产生的误差与距离 L 有关。因此,将上述测量误差统一用比例系数 k 修正。此时,测量距离可修正为:

$$L_L=(1+k)\times L \tag{5}$$

式中:L 表示未修正的距离测量值。

考虑零位误差、时间测量误差和时间延迟误差的影响,测距存在固定的误差 v,回波强度对测量距离产生的测量误差 u。

由于激光雷达正常工作时,影响误差的因素较多,没有标准规定激光雷达在何种环境下工作是不受误差影响的,所以需要给定激光雷达一个工作环境,即确定一个测量距离、回波强度,规定激光雷达在该条件下测距误差为零,也可因此消除因零位误差、时间测量误差和时间延迟误差引起的测距误差 v。

因此,综合考虑,激光雷达修正后的距离测量值 L_Q 为:

$$L_Q=(1+k)\times L+u \tag{6}$$

式中:L_Q 表示经过修正系数 k 和 u 修正后的距离测量值。

2.2 测角误差修正模型

引起激光雷达角度测量误差主要原因是在制造设备过程中机械扫描轴与码盘轴偏心引起的偏心误差。

针对上述的偏心误差,文中提出了一种三角形标定方法,标定原理图如图 2 所示。将激光雷达几何中心和 MISUMI RPG110 手动千分尺旋转工作台几何旋转中心重合并固定,距离激光雷达一定距离处放置一个表面光滑的障碍物 AB。旋转手动旋转工作

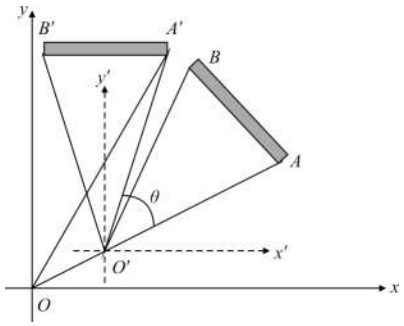

图 2 测角误差标定原理图

Fig.2 Schematic of angle error calibration principle

台 θ 角度,障碍物 AB 转换到 $A'B'$ 位置处。激光雷达发射中心到障碍物 AB 和 $A'B'$ 的位置信息可由读取激光雷达数据得到,其形式为:

$$P=\{(\rho_i,\ \sigma_i)|i=1,2,3,\cdots,N\} \tag{7}$$

$$Q=\{(\lambda_i,\ \mu_i)|i=1,2,3,\cdots,N\} \tag{8}$$

式中:ρ_i、λ_i 为扫描点到激光雷达中心的距离,σ_i、μ_i 为扫描点与激光雷达的连线和极轴之间的夹角。

为方便计算,将公式(7)、(8)转换成直角坐标的形式,可得障碍物 AB 和 $A'B'$ 上的坐标分别为:

$$P=\{(x_i,\ y_i)|\ i=1,2,\cdots,N\} \tag{9}$$

$$Q=\{(m_i,\ n_i)|\ i=1,2,\cdots,N\} \tag{10}$$

已知障碍物 AB 和 $A'B'$ 第一个点的坐标$(x_1,\ y_1)$和$(m_1,\ n_1)$,旋转的角度为 θ,激光雷达几何旋转中心的坐标可表示为:

$$\begin{cases} x_{o'}=\left|\dfrac{\sin\dfrac{\pi-\theta}{2}}{2\sin\dfrac{\theta}{2}}(y_1-n_1)\right|+\dfrac{x_1-m_1}{2} \\ y_{o'}=\dfrac{x_1-m_1}{y_1-n_1}\left|\dfrac{\sin\dfrac{\pi-\theta}{2}}{2\sin\dfrac{\theta}{2}}(y_1-n_1)\right|+\dfrac{y_1-n_1}{2} \end{cases} \tag{11}$$

因此,激光雷达测角误差修正模型为:

$$R=\{(X_i-x_{o'},\ Y_i-y_{o'})|\ i=1,2,\cdots,M\} \tag{12}$$

式中:X_i、Y_i 为原始数据坐标。

2.3 移动机器人坐标系统修正模型

激光雷达获得周围环境数据后,由于存在测距、测角误差,由局部地图转换为全局地图时,全局地图精度降低。由公式(2)可将障碍物由传感器坐标系转换为全局坐标系坐标,通过修正坐标转换公式提高全局地图精度,修正公式为:

$$^{M}P=\begin{bmatrix}\cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}L_Q\cos\theta+x_s \\ L_Q\sin\theta+y_s\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}x_r-x_{o'} \\ y_r-y_{o'}\end{bmatrix} \tag{13}$$

3 测距和测角误差标定实验

3.1 激光雷达测距误差标定

3.1.1 建立激光雷达测距误差修正模型

确定回波强度引起的测距误差,首先需要测量在激光雷达回波强度范围内尽可能多的强度值与误差的对应关系。在激光雷达前方放置尽可能多的表面物理特性不同的障碍物,激光雷达回波强度最大在 2 400 左右,选定激光雷达在测距 200 mm、回波强度为 2 400 时,激光雷达测距误差为零。在距离 200 mm 处放置尽可能多的表面物理特性不同的障碍物,每组记录 50 000 次数据。理论上,激光雷达测得不同的障碍物的距离应该为 200 mm,但是实际激光雷达测得的距离数值随着回波强度的不同而改变。由于障碍物到激光雷达的距离不变,所以在此实验环境下,认为激光雷达的测距误差全部是由回波强度引起的。

对获取的回波强度与误差数据组$(x_i,\ y_i)$选取不同类型拟合函数进行数据拟合,其对应的拟合效果指标 R^2 和 RMSE 如表 1 所示。比较拟合指标可知,利用指数函数进行数据拟合时,数据拟合效果较好。

表 1 拟合指标对照表

Tab.1 Fitting index comparison table

	Exponential(2)	Fourier (2)	Polynomial(3)	Power(2)	Rational (3, 3)
R^2	0.911 1	0.911	0.908 6	0.900 6	0.899
RMSE	2.998	3.001	3.04	3.168	3.199

因此,回波强度与误差拟合函数关系为:

$$f(x)=-326\ 000e^{-0.001\ 598x}+325\ 900e^{-0.001\ 597x} \tag{14}$$

该拟合函数图像如图 3 所示,可知激光雷达测距误差随着回波强度的增大而逐渐减小。

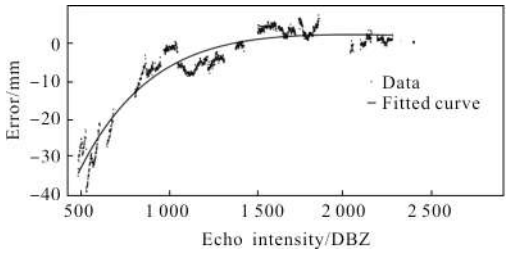

图 3 回波强度与误差拟合函数

Fig.3 Echo intensity and error fitting function

UST-10LX 激光雷达的有效测量距离为 0.1~10 m,采用反射率较高的白纸,放置在实验平台上不同的距离处进行测量,在 0.2~9.8 m 间每 10 cm 测量一组数据,获得 97 组数据。每个距离点连续测量 10 000 次数据,每次测量间隔时间为 0.5 s。在以上数据中剔除非正常数据和测量值明显有别于其他数据的脉冲性干扰,选取出现次数最多的同一回波强度所对应距离的平均值。在实验过程中发现白纸放置的距离不同则该障碍物的回波强度随之发生改变,因此在实验过程中要去除回波强度引起的误差。

对获取的测量距离与误差数据组$(x_i,\ y_i)$选取不同类型拟合函数进行数据拟合,其对应的拟合效果

指标 R^2 和 RMSE 如表 2 所示。比较拟合指标可知，傅里叶函数进行数据拟合时，数据拟合效果较好。

表2 拟合指标对照表

Tab.2 Fitting index comparison table

	Exponential(2)	Fourier (2)	Polynomial(3)	Power(2)	Rational (3, 3)
R^2	0.808 7	0.842 2	0.817 8	0.813 1	0.803 5
RMSE	5.987	5.497	5.843	5.885	6.167

因此，测量距离与误差拟合函数关系为：

$$f(x)=919.7-966.6\cos(-1.341\times10^{-4}x)+52.28\cos(-2.682\times10^{-4}x)+777\sin(-1.341\times10^{-4}x)-326.3\sin(-2.682\times10^{-4}x) \tag{15}$$

该拟合函数图像如图 4 所示，激光雷达测距误差总体趋势随着距离的增大而逐渐变大。

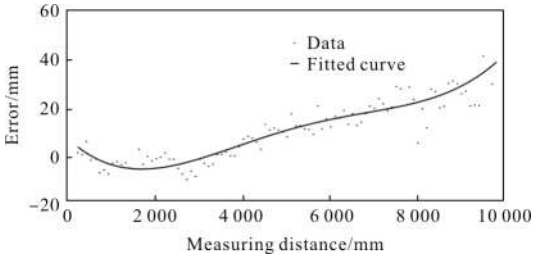

图 4 距离与误差拟合函数

Fig.4 Distance and error fitting function

综上所述，将公式(14)、(15)代入公式(6)中，得到激光雷达测距误差修正模型为：

$$L_Q=x_L+919.7-966.6\cos(-1.341\times10^{-4}x_L)+52.28\cos(-2.682\times10^{-4}x_L)+777\sin(-1.341\times10^{-4}x_L)-326.3\sin(-2.682\times10^{-4}x_L)-326\,000e^{-0.001\,598x_u}+325\,900e^{-0.001\,597x_u} \tag{16}$$

式中：L_Q 为修正后的测量距离；x_L 为修正前的测量距离；x_u 为回波强度。

3.1.2 验 证

选取不同粗糙度表面和颜色的物体搭建实验验证样本如图 5、6 所示，激光雷达采集实验样本的原始数据并通过测距误差修正模型修正，得到两个实验验证样本的原始数据和修正后数据对比图，如图7、8 所示。由于两个验证样本是平面状态，采集的理想数据应为一条直线，且相邻两个数据纵坐标差值的标准差为0。样本 1 的数据密集，在小幅度上数据会出现跳动，计算修正前后所有数据点与前第 20 个数据点的纵坐标差值的标准差。样本 2 数据密集度适中，计算修正前后所有数据点与前第 5 个数据点的纵坐标差值的标准差。采集的样本数据特点不同，计算的数据间隔也不同，数据点越密集，间隔越大。针对两个验证样本随机选取三组数据计算修正前后标准差如表 3 所示。可知，修正后数据更加平稳，测距误差修正模型合理有效。

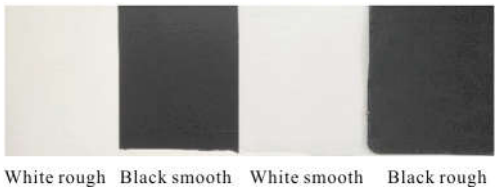

图 5 实验验证样本 1

Fig.5 Experimental verification sample 1

图 6 实验验证样本 2

Fig.6 Experimental verification sample 2

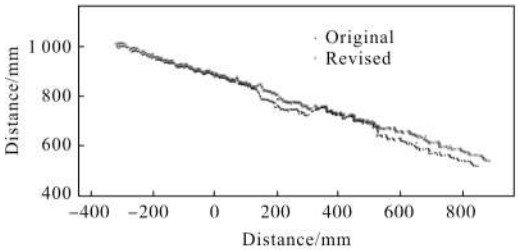

图 7 样本 1 数据对比

Fig.7 Sample 1 data comparison

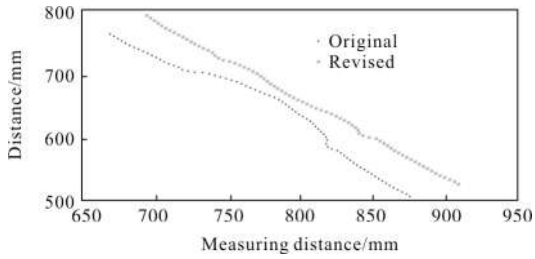

图 8 样本 2 数据对比

Fig.8 Sample 2 data comparison

表 3 样本数据分析表

Tab.3 Sample data analysis table

	Data 1		Data 2		Data 3	
Status	Original	Revised	Orignal	Revised	Orignal	Revised
Sample 1	15.59	9.89	15.98	10.72	14.56	9.56
Sample 2	3.04	1.26	3.57	1.23	3.82	1.35

3.2 激光雷达测角误差标定

3.2.1 建立激光雷达测角误差修正模型

UST-10LX 激光雷达最大分辨率为 0.25°。为提高实验精确度，要求一条激光束刚好可检测到障碍物的一个边缘。当激光束可以测量到障碍物边缘时，数值有时会出现抖动的现象，因此，需要测量激光束角度变化的敏感度。

MISUMI RPG110 手动千分尺旋转工作台的角度分辨率为 0.01°，测量激光雷达敏感度实验台测试原理[9]如图 9 所示。将激光雷达几何中心和旋转工作台几何旋转中心重合固定。距离激光雷达约 1.5 m 处位置处放置一个检测板，在检测板后方 0.8 m 处放置一个背景板。选中检测板边缘的激光束，转动旋转工作台，每转动 0.01°记录一组该激光束数据(1 000 次测量值)，激光束角度和状态对应关系如表4所示。实验过程中发现，该激光束状态从平稳到出现抖动再到平稳。计算该激光束出现抖动和停止抖动的角度差值，测得 UST-10LX 激光雷达发生混合像素干扰的敏感角度为 0.05°。

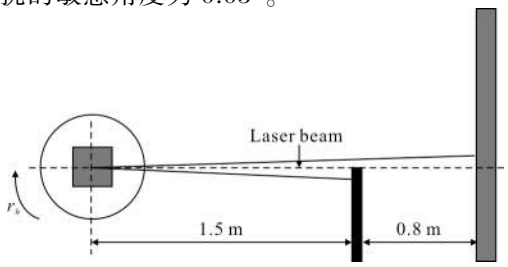

图 9 激光雷达角度敏感度测试原理图

Fig.9 Schematic of LiDAR angle sensitivity test

由建立的激光雷达测角误差修正模型可知，测角误差主要是偏心误差引起的。测角误差标定实验原理图如图 10 所示，激光雷达的机械旋转中心和旋转台的旋转中心重合，在距离激光雷达约 1.4 m 处放置一个表面光滑且回波强度较好的障碍物。考虑激光束敏感度的影响，调节旋转工作台，使得任意一条激光束恰好可以探测到障碍物的右边缘，且测量的数值不会发生抖动，固定旋转台，测得 10 000 组数据后，旋转工作台。重复测量，获取四组数据分别位于-38.5°~-21°、15.5°~33°、134.5°~-152°和 169°~186.5°位置处。采集数据选取出现次数最多的同一回波强度所对应距离的平均值。分别选取数据 1 和 2、数据 2 和 3、数据 3 和 4 计算激光雷达几何旋转中心的坐标如表 5 所示，通过取平均值获得旋转中心坐标为(-1.63，-12.65)。障碍物和旋转中心位置如图 11 所示。

表 4 激光束角度与状态对应表

Tab.4 Laser beam angle and state correspondence table

Laser beam angle/(°)	Laser beam state
39.09	Smooth
40.00	Jitter
…	…
40.04	Jitter
40.05	Smooth

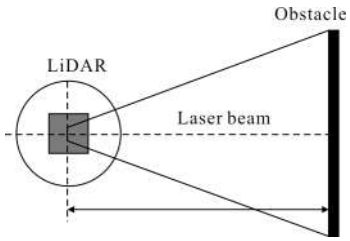

图 10 测角误差标定实验原理图

Fig.10 Schematic of angle error calibration experiment

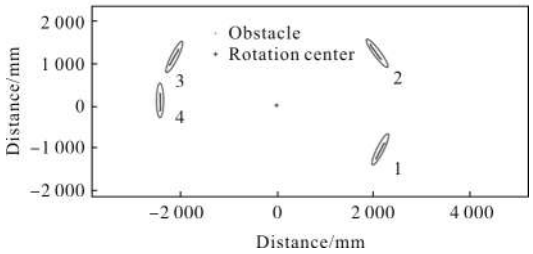

图 11 实际位置示意图

Fig.11 Actual position diagram

表 5 样本数据分析表

Tab.5 Sample data analysis table

	Position 1, 2	Position 2, 3	Position 3,4
Distance/mm	(-3.63,-11.32)	(-1.84,-13.95)	(0.57,-12.68)

3.2.2 验 证

通过旋转工作台使激光雷达在不同角度获取同一环境信息,数据显示如图 12 所示。将旋转后获取的数据极角转换为旋转前对应数据极角，获取的对比图如图 13 所示。激光雷达获取两个位置处障碍物坐标经过测角误差修正模型后,位置对比见图 14。

文中通过计算修改前后两组数据对应点距离的平均值并进行对比,描述修正效果。两组数据的平均值分别为 p_1=11.32、p_2=8.17。可知,通过该标定方法建立的测角误差修正模型可以提高地图构建的精度。

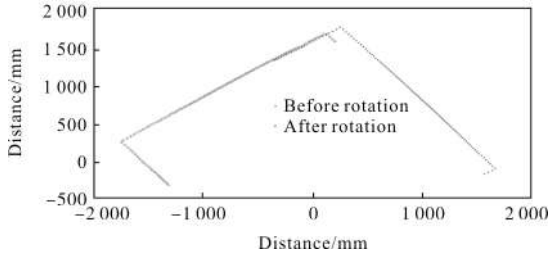

图 12 障碍物实际位置示意图

Fig.12 Chart of actual location of obstacles

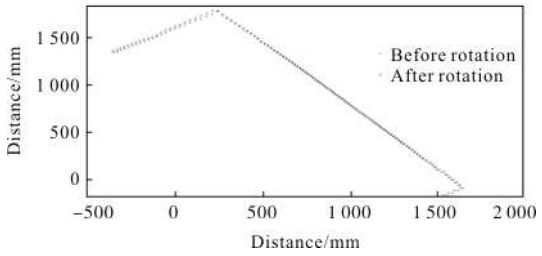

图 13 障碍物位置对比图

Fig.13 Chart of obstacle position comparison

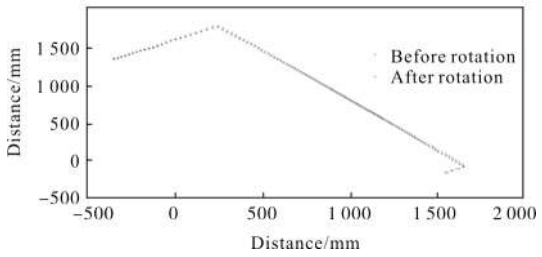

图 14 修正后位置对比图

Fig.14 Chart of corrected position comparison

根据公式(13)、(16)和激光雷达几何旋转中心坐标得到修正后坐标系统数学模型：

$$^{M}P=\begin{bmatrix}\cos\alpha & -\sin\alpha\\ \sin\alpha & \cos\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}L_Q\cos\theta+x_s\\ L_Q\sin\theta+y_s\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}x_r\\ y_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-1.63\\ -12.65\end{bmatrix} \tag{17}$$

式中：$L_Q=919.7-966.6\cos(-1.341\times10^{-4}x_L)+52.28\cos(-2.682\times10^{-4}x_L)+x_L+777\sin(-1.341\times10^{-4}x_L)-326.3\sin(-2.682\times10^{-4}x_L)-326\,000e^{-0.001\,598x_u}+325\,900e^{-0.001\,597x_u}$。

当移动机器人进行地图构建时，激光雷达通过传感器坐标系获取周围环境信息，利用坐标转换系统向全局坐标系转换。通过激光雷达误差修正模型修正移动机器人坐标，提高了机器人地图构建的精度,从而达到移动机器人性能要求。

4 结 论

为提高移动机器人对环境地图构建的精度,文中提出了激光雷达测距、测角的标定方法。

(1) 通过误差传播定律分析了引起激光雷达测距误差的主要因素是激光束的回波强度和障碍物到激光雷达距离。建立了激光雷达测距误差修正模型。通过对激光雷达测角工作原理进行研究，分析引起测角误差的因素,文中提出了一种三角形标定方法,建立了测角误差修正模型。

(2) 通过 UST-10LX 激光雷达采集数据，并计算出测距误差修正模型。经过实验验证,修正后平面障碍物数据纵坐标差值的标准差提高了 30%~60%,更接近物体真实几何特征。

(3) 通过 UST-10LX 激光雷达采集数据，计算激光雷达几何旋转中心坐标，得到测角误差修正模型。经过实验验证,该标定方法使障碍物数据的重合效果提高了 30%。

(4) 根据激光雷达测距、测角误差修正模型,修正了移动机器人坐标系统，提高了机器人地图构建的精度。

参考文献：

[1] Singh N H, Thongam K. Mobile robot navigation using MLP -BP approaches in dynamic environments [J]. ***Arabian Journal for Science & Engineering***, 2018, 43: 1-16.

[2] Lamini C, Benhlima S, Elbekri A. Genetic algorithm based approach for au tonom ous mobile robot path planning [J]. ***Procedia Computer Science***, 2018, 127:

180-189.

[3] Jian M, Tang M, Zhang C, et al. Indoor mobile robot map construction based on improved linear feature extraction algorithm [J]. ***Computer Engineering***, 2018, 44(1): 23-29.

[4] Chen Q. Research on simultaneous localization and map construction of mobile robot based on adaptive method [J]. ***Microcomputer Applications***, 2018, 3: 24-28.

[5] Han Wei. Autonomous navigation of multi-sensor based crawler robot in outdoor environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
韩伟. 室外环境基于多传感器履带式机器人自主导航[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.

[6] Xiang Zhiyu. Fast 3D scanning laser radar system design and calibration [J]. ***Journal of Zhejiang University (Engineering Science)***, 2006, 40(12): 2130-2133. (in Chinese)
项志宇. 快速三维扫描激光雷达的设计及其系统标定[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(12): 2130-2133.

[7] Gielsdorf F, Rietdorf A, Gruendig L. A concept for the calibration of terrestrial laser scanners[C]//Proceedings FIG Working Week (on CD-ROM). Athens, Greece: International Federation of Surveyors, 2004.

[8] Reshetyuk Y. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology(KTH), 2006.

[9] Yu Jinxia, Cai Zixing, Zou Xiaobing, et al. Research on ranging performance of laser scanner in the navigation of mobile robot [J]. ***Chinese Journal of Sensors and Actuators***, 2006, 19(2): 356-360. (in Chinese)
于金霞, 蔡自兴, 邹小兵, 等. 移动机器人导航中激光雷达测距性能研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(2): 356-360.

[10] Lindner M, Schiller I, Kolb A, et al. Time-of-Flight sensor calibration for accurate range sensing [J]. ***Computer Vision & Image Understanding***, 2010, 114 (12): 1318-1328.

[11] Ma Hao. Research of error calibration method of airborne lidar system [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
马浩. 机载激光雷达测量系统误差检校方法研究 [D]. 济南: 山东科技大学, 2011.

[12] Wang Guining, Liu Bingyi, Feng Changzhong, et al. Data quality control method for VAD wind field retrieval based on coherent wind lidar [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(2): 0230002. (in Chinese)
王贵宁, 刘秉义, 冯长中, 等. 相干测风激光雷达 VAD 风场反演的数据质量控制方法 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0230002.

[13] Du Yuhong, Wei Kunpeng, Shi Yijun, et al. Infrared detection and clustering grey fusion prediction model of water quality turbidity [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(10): 1028002. (in Chinese)
杜玉红, 魏坤鹏, 史屹君, 等. 水质浊度红外光检测及聚类灰色融合预测模型 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1028002.

[14] Du Yuhong, Ma Ting, Yang Chengwu, et al. Detection clustering analysis algorithm and system parameters study of the near-point multi-class foreign fiber [J]. ***Journal of the Textile Institute***, 2017, 108(6): 1022-1027.

[15] Luo Le, Wu Changqiang, Lin Jie, et al. Time-domain denoising based on photon-counting LiDAR [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2018, 26(5): 1175-1180. (in Chinese)
骆乐, 吴长强, 林杰, 等. 基于光子计数激光雷达的时域去噪[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(5): 1175-1180.

[16] Yang Juqing, Wang Dayong, Dong Dengfeng, et al. Laser measurement based evaluation for orthogonal transformation calibration of robot pose [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2018, 26 (8): 1985-1993. (in Chinese)
杨聚庆, 王大勇, 董登峰, 等. 激光测量标定机器人坐标系位姿变换的正交化解算方法[J]. 光学 精密工程, 2018, 26 (8): 1985-1993.

[17] Bu Yuming, Du Xiaoping, Zeng Zhaoyang, et al. Development and trend analysis of scannerless 3D imaging ladar [J]. ***Chinese Optics***, 2018, 11 (5): 711-727.
卜禹铭, 杜小平, 曾朝阳, 等. 无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析[J]. 中国光学, 2018, 11(5): 711-727.

[18] Wen Ya, Wu Chunting, Yuan Zerui, et al. Research progress of far-infrared solid state lasers [J]. ***Chinese Optics***, 2018, 11(6): 889-900. (in Chinese)
温雅, 吴春婷, 袁泽锐, 等. 远红外固体激光器研究进展[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 889-900.