

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.01

# 激光雷达性能参数对轮式机器人建图质量影响研究

崔佳慧, 姜延欢, 张昱, 吴娅辉

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室  
动态测试与校准技术航空科技重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 针对轮式机器人系统环境建图精度低的问题, 基于轮式机器人运动学模型、传感器模型和融合算法等理论及分析, 建立轮式机器人系统模型, 通过仿真实验综合分析激光雷达性能参数(视场角、角分辨率)对环境建图过程中轮式机器人位姿及建图质量的影响规律。研究发现, 随着时间变化,  $x$  坐标轴和  $y$  坐标轴方向的位置不确定性曲线呈现周期下降趋势, 角度误差呈现出围绕一个值上下振荡的趋势; 随着激光雷达视场角的增大, 曲线震荡减少, 且更趋于平滑, 同时建图结果的白色边界更加清晰且完整; 随着激光雷达的角分辨率增大, 曲线震荡增多, 且振幅更大, 同时建图结果的白色边界更加模糊, 精度更低。因此, 可通过增大激光雷达视场角、减小角分辨率提高机器人系统环境建图精度。

**关键词:** 轮式机器人; 扩展卡尔曼滤波; 位姿; 建图; 仿真

中图分类号: TB96

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)02-0001-09

## Study on the influence of lidar performance parameters on the quality of wheeled robot mapping

CUI Jiahui, JIANG Yanhuan, ZHANG Yu, WU Yahui

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology &amp; Calibration, Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Dynamic Testing and Calibration, Beijing, 100095, China)

**Abstract:** This article mainly aims at the problem of low accuracy of environmental mapping of wheeled robot system. Based on the theoretical and analytical research of wheeled robot kinematics model, sensor model and fusion algorithm, the model of wheeled robot system is established. Finally, through the simulation experiment, the impact of the performance parameters of laser radar (field of view, angular resolution) on the position and pose of wheeled robot and the quality of mapping during the environmental mapping process is comprehensively analyzed. It is found that the position uncertainty curve in the direction of the  $x$  and  $y$  coordinate axes shows a periodic downward trend with time, and the angle error shows a trend of oscillation up and down around a value. As the angle of view of the lidar increases, the curve oscillation decreases and tends to be smoother, and the white boundary of the mapping results becomes clearer and more complete. As the angular resolution of the lidar increases, the curve oscillations increase, and the amplitude is larger. At the same time, the white boundary of the mapping results is more blurred, and the accuracy is lower. Therefore, the accuracy

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-03-22

基金项目: 国家“十四五”技术基础项目(KBC52102580); 航空计量所创新基金项目(ZC02201580)

引用格式: 崔佳慧, 姜延欢, 张昱, 等. 激光雷达性能参数对轮式机器人建图质量影响研究[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 1-9.

Citation: CUI J H, JIANG Y H, ZHANG Y, et al. Study on the influence of lidar performance parameters on the quality of wheeled robot mapping[J]. Metrology &amp; Measurement Technology, 2023, 43(2): 1-9.



of robot system environment mapping can be improved by increasing the angle of view of the lidar and reducing the angular resolution.

**Key words:** wheeled robot; extended Kalman filter; pose; mapping; simulation

## 0 引言

近年来,随着人工智能和深度学习的快速发展,智能轮式机器人<sup>[1-2]</sup>可以通过自身携带的惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、里程计、激光雷达等传感器<sup>[5-6]</sup>探索出自身的位姿,并规划出到达目标位置的路径,同时建立周围环境地图,实现在未知环境中的全自主运动<sup>[3-4]</sup>。随着建图质量的提高,智能轮式机器人可以代替人类在一些恶劣环境中工作、实验和战斗,需求很大。

虽然IMU<sup>[7]</sup>比较简单便捷,但存在累积误差,所以通过IMU一种传感器信息得到机器人准确的位姿估计非常困难。而激光雷达具有精度高、抗干扰能力强、实时性好的特点,可以通过激光点云匹配技术来探索轮式机器人的位姿并构建出环境地图。尽管激光雷达建图精度高,但是在走廊、大厅等环境地图特征非常相似的区域,如果仅仅依靠激光雷达进行高精度建图很难,因为环境特征相似的区域会导致数据关联质量较差,从而导致建图效果很差。

针对各种传感器的局限性,需要对多种传感器通过滤波算法进行信息融合<sup>[8]</sup>。在常用的融合算法中,卡尔曼滤波<sup>[9]</sup>只适用于线性系统,而轮式机器人运动等属于非线性情况,故不适用。无迹卡尔曼滤波<sup>[11]</sup>在很多分段函数模型中造成结果的发散和有偏。而扩展卡尔曼滤波<sup>[10]</sup>(Extended Kalman Filter, EKF)可以较好地解决非线性情况,易于使用、适用性广且计算效率较高,因此本文使用了基于EKF的融合算法。

Gan Q<sup>[12]</sup>等人基于卡尔曼滤波的测量估计和状态融合分析,得出了状态预测步骤与状态更新步骤的融合理论。Hess W<sup>[13]</sup>等人提出了整体基于图优化框架的Cartographer模型,该模型前端主要得到轮式机器人位姿和环境建图的子图,算法后端主要基于各个子图之间的约束关系进行优化,从而修正子图的位姿并建成环境地图。其中位姿通过滤波算法融合IMU、里程计等传感器数据得到

的,子图通过帧间匹配算法构建。但是该模型没有充分利用IMU、里程计等传感器的数据,单纯进行了简单的数据融合,且在后端优化中约束条件只利用了激光点云和子图之间的配准和前后帧的匹配。在转弯或者非结构环境运动时,容易闭环失败,因为此时容易发生假阳性点云配准。

目前,很多研究方法通过融合相机、IMU、里程计、激光雷达等传感器数据得到定位及姿态信息、环境地图,但大部分是相对简单的融合方法,且没有进一步分析机器人结构层面、传感器层面、数据融合层面等各种因素以及其高度耦合对轮式机器人位姿和建图质量<sup>[14]</sup>的影响规律。因此,如何有效利用各类传感器机理信息,构建准确、有效、可靠的轮式机器人系统模型,找到影响机器人位姿和建图质量的关键因素及其规律具有重要的意义。

激光雷达在生成高精度地图中是一个非常重要的传感器,研究得到激光雷达性能参数对建图质量的影响规律是提升智能轮式机器人环境建图精度的基础。为了确保轮式机器人环境地图构建准确的基础条件,本文针对轮式机器人系统环境建图精度低的问题,主要从位姿及建图质量影响因素方面展开研究及分析。

## 1 轮式机器人系统建模

在轮式机器人的运动过程中,可以通过里程计等内部传感器推算出轮式智能机器人位姿,虽然短时间内比较准确,但是累积误差会随着时间的增长而增大,机器人的位姿误差将会受到影响,从而导致环境建图的精度较低,这是因为外部传感器得到的未知环境中的地标位置是基于轮式智能机器人的位姿信息推算出来的。另一方面,也需要通过地标的位置观测信息来校正轮式智能机器人的位姿信息,因此构建的环境地图的精度同样影响着轮式智能机器人的定位精度。所以,需要同时分析和处理轮式智能机器人的定位和环境建图。具体实施步骤如图1所示。

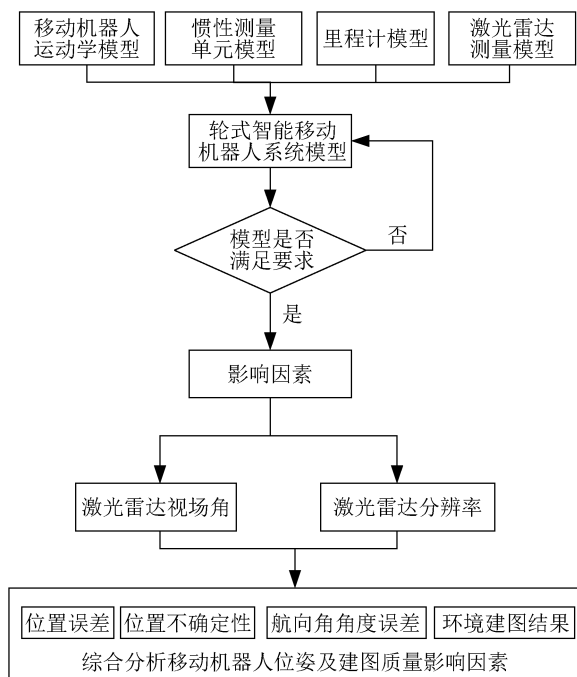


图1 轮式机器人位姿及建图质量影响因素分析仿真实验流程图

Fig.1 Flow chart of simulation experiment for analysis of influential factors of wheeled robot posture and mapping quality

首先建立轮式机器人运动学模型：假设地面为理想的水平地面，车轮为理想不变形的车轮且忽略车轮的厚度，地面与所有机器人车轮的摩擦系数大小一样，同时假设车轮和地面单点接触，以地面为参考系，宏观分析轮式机器人在地面上的运动。在该坐标系中，以轮式机器人的重心为原点，以轮式机器人正前方向为横轴方向，对轮式机器人进行运动分析。轮式机器人运动学模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_F \\ V_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $V_F$ 为轮式机器人运动速度在横坐标轴的分量；当轮式机器人发生转向时（逆时针是正方向）， $V_s$ 为侧向位移速度，m/s； $\omega$ 为横摆角速度，rad/s。

然后通过四元数法求解IMU姿态角<sup>[7]</sup>。四元数能建立三维空间与四维空间的关系，基于其性质研究分析三维空间刚体旋转的情况，表达式为

$$Q = q_0 + q_1 \times i + q_2 \times j + q_3 \times k \quad (2)$$

式中： $q_0$ 为实数； $q_1, q_2, q_3$ 为虚数。

通过提取轮子的编码信息得到里程计的信息，

即通过对速度积分计算出轮式机器人当前时刻的位置信息。当机器人发生打滑或漂移时，机器人的内部坐标和世界坐标会发生偏差。随着时间变化，该方法得到的数据累计误差会变大。当 $t-1$ 变化到 $t$ ，编码器读数从 $a$ 变化到 $a+n$ ，轮式机器人的移动距离 $d$ 可表示为

$$d = \frac{n}{p} \times 2\pi r \quad (3)$$

式中： $r$ 为车轮半径，m； $p$ 为编码器线数。

轮式机器人普遍使用两轮差速驱动。设两轮的轮间距为 $D$ ，从 $t-1$ 到 $t$ 时间间隔内，左轮的移动距离为 $d_l$ ，右轮的移动距离为 $d_r$ ，机器人的运动距离可表示为 $\Delta d_t = \frac{1}{2}(d_l + d_r)$ ，机器人的旋转角可表示为 $\Delta\theta_t = \frac{d_l - d_r}{D}$ ，在微小的时间间隔内认为机器人是沿圆弧运动的，该圆弧的半径可表示为 $R_t = \frac{\Delta d_t}{\Delta\theta_t}$ ，通过里程计参数对 $(R_t, \Delta\theta_t)$ 更新轮式机器人的运动。

基于似然域的建模方法，建立激光雷达的测量模型。在极坐标中，激光雷达的测量模型为

$$Z_t^k = (d_z k \cdot \mu)^T \quad (4)$$

式中： $Z_t^k$ 为 $t$ 时刻第 $k$ 个激光束的观测量，m； $d_z$ 为障碍物的测得距离，m； $\mu$ 为激光雷达扫描分辨率。

最终通过EKF进行融合，基于带有高斯噪声的状态空间模型，建立系统的运动模型和观测模型，从而获得轮式机器人位姿及地标位置的联合后验概率密度的最优估计，最终实现轮式机器人系统模型的构建。

## 2 影响因素评价指标分析

为了研究各因素对轮式机器人位姿及建图质量的影响规律，选取轮式机器人 $x$ 和 $y$ 方向的位置不确定性<sup>[15-16]</sup>、激光扫描结果的位置误差和角度误差等指标分析影响规律。 $x$ 方向的位置不确定性定义为

$$SD_x = \sqrt{C_x \cdot \text{cov}P_x \cdot C_x^T + wS_x \cdot \text{cov}S_x + wO_x \cdot \text{cov}O_x} \quad (5)$$

式中： $SD_x$ 为 $x$ 方向位置不确定性； $C_x$ 为 $x$ 方向位置的控制参数； $C_x^T$ 为 $C_x$ 的转置矩阵； $\text{cov}P_x$ 为 $x$ 方向位置的协方差矩阵； $wS_x$ 为激光雷达在 $x$ 方向位置的控制权重； $\text{cov}S_x$ 为激光雷达在 $x$ 方向位置的协方差矩阵； $wO_x$ 为里程计在 $x$ 方向位置的控制

权重； $covO_x$ 为里程计在 $x$ 方向位置的协方差矩阵。 $y$ 方向的位置不确定性定义为

$$SD_y = \sqrt{C_y \cdot covP_y \cdot C_y^T + wS_y \cdot covS_y + wO_y \cdot covO_y} \quad (6)$$

式中： $SD_y$ 为 $y$ 方向位置不确定性； $C_y$ 为 $y$ 方向位置的控制参数； $C_y^T$ 为 $C_y$ 的转置矩阵； $covP_y$ 为 $y$ 方向位置的协方差矩阵； $wS_y$ 为激光雷达在 $y$ 方向位置的控制权重； $covS_y$ 为激光雷达在 $y$ 方向位置的协方差矩阵； $wO_y$ 为里程计在 $y$ 方向位置的控制权重； $covO_y$ 为里程计在 $y$ 方向位置的协方差矩阵。

激光雷达扫描结果位置误差和角度误差分别为

$$E_{s,p} = S_{p,t} - S_{p,e} \quad (7)$$

$$E_{s,a} = S_{a,t} - S_{a,e} \quad (8)$$

式中： $E_{s,p}$ 为激光雷达扫描结果位置误差； $S_{p,t}$ 为真实位置； $S_{p,e}$ 为激光雷达扫描测量位置； $E_{s,a}$ 为激光雷达扫描结果角度误差； $S_{a,t}$ 为真实角度； $S_{a,e}$ 为激光雷达扫描测量角度。

### 3 标准数字地图

为了研究激光雷达性能参数对环境建图过程中轮式机器人位姿及建图质量的影响规律，预先构建一个标准数字地图，通过让轮式机器人在该标准数字地图场景中运动，得到仿真感知信息（结果值），通过与标准数字地图（标准值）进行对比，得到不同参数下的相对误差。

如图2所示，标准数字地图中左上角的黑色直角等腰三角形、左下角的矩形和右侧的矩形分别表示建图过程中的障碍物。为了方便和建图结果进行比对，选取典型的部位：全局尺寸 $a$ 、全局尺寸 $b$ 、局部尺寸 $a_1$ 和局部尺寸 $b_1$ 作为标准值。

## 4 结果和讨论

### 4.1 激光雷达视场角对轮式机器人建图质量的影响研究

激光雷达作为一种环境建图的核心传感器，在帮助轮式机器人获取周围环境坐标信息的同时，为后续导航定位做辅助，是高精度环境建图的关键。为了研究激光雷达视场角对环境建图过程中轮式机器人位姿及建图质量的影响规律，选取视场角分别为 $\pi$ 和 $2\pi$ 进行研究，与此同时，为了避免其他参数的影响，所有实验均在相同路标和相

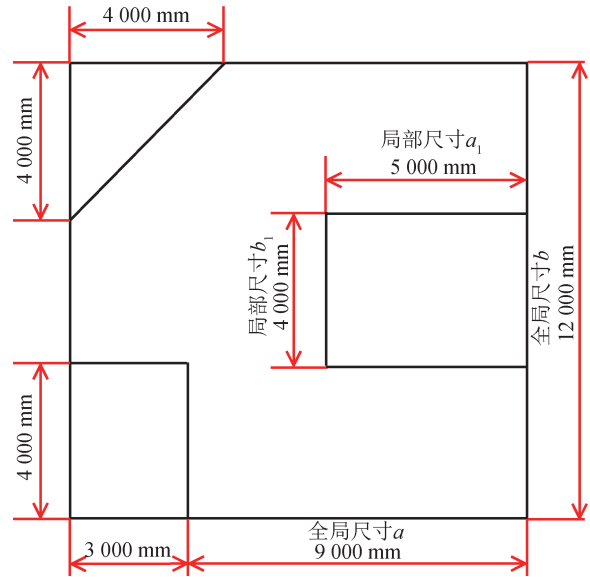


图2 标准数字地图

Fig.2 Standard digital map

同的路径规划下进行。

对比不同视场角条件下，激光扫描结果的位置误差和角度误差、轮式机器人 $x$ 和 $y$ 方向的位置不确定性等指标变化规律。

由激光雷达视场角对其扫描结果的位置误差的影响（图3）可以看出：随着时间变化，位置误差呈现出围绕一个值上下浮动的平稳趋势；由于噪声以及拐角视觉盲区的出现，位置误差会瞬时出现突增；随着激光雷达视场角的增大，位置误差震荡更趋于平稳，且突变位置减少，误差最大值更是从0.85 m降到了0.35 m。可以通过增大激光雷达的视场角降低其扫描结果位置误差。

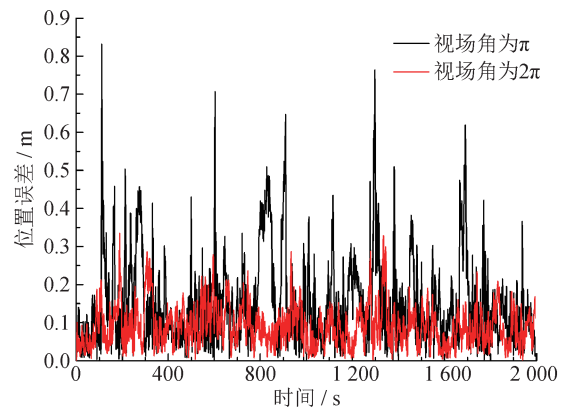


图3 激光雷达视场角对其扫描结果的位置误差的影响

Fig.3 Influence of lidar view field angle on the position error of its scanning results

由激光雷达视场角对其扫描结果的角度误差的影响(图4)可以看出:随着时间变化,角度误差围绕一个值上下浮动;由于噪声以及拐角视觉盲区的出现,角度误差会瞬间出现突增;随着视场角的增大,角度误差震荡更趋于平稳,且突变位置减少,角度误差最大值降了一个数量级,从0.18 rad降到了0.06 rad。

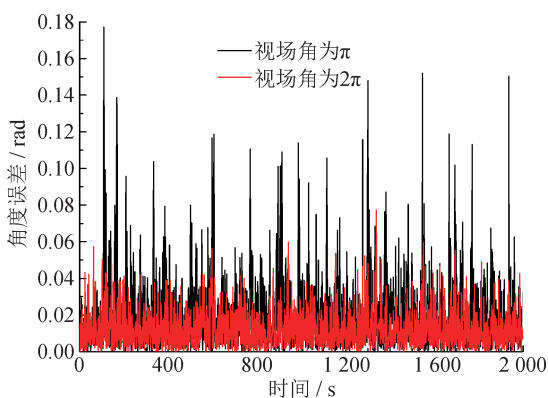


图4 激光雷达视场角对其扫描结果的角度误差的影响  
Fig.4 Influence of lidar view field angle on the angle error of its scanning results

由激光雷达视场角对x方向位置不确定性的影响(图5)可以看出:随着时间变化,在该方向位置不确定性呈现单峰周期性降低变化趋势;随着视场角的增大,可视角度范围变大,该方向位置不确定性曲线突变位置大量变少,曲线趋于平滑。

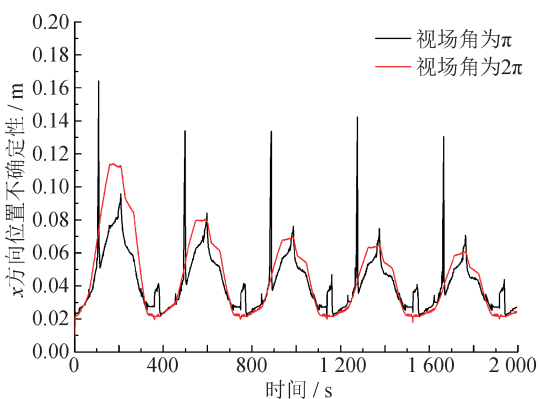


图5 激光雷达视场角对x方向位置不确定性的影响  
Fig.5 Influence of lidar view field angle on x-direction position uncertainty

由激光雷达视场角对y方向位置不确定性的影响(图6)可以看出:随着时间变化,在该方向位置不确定性整体呈现双峰,且第一峰值和第二峰

值出现周期性降低变化趋势,这和机器人路径存在拐角有关;随着视场角的增大,显著增大了可视角度范围,该方向位置不确定性突变尖刺变少,曲线趋于平滑,在1560~1940 s的周期中不确定性最大值基本为0.06 m。

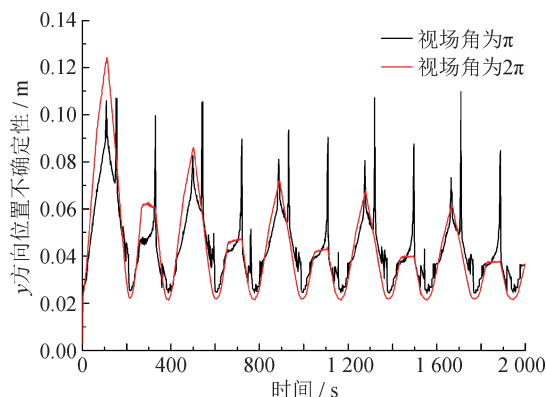
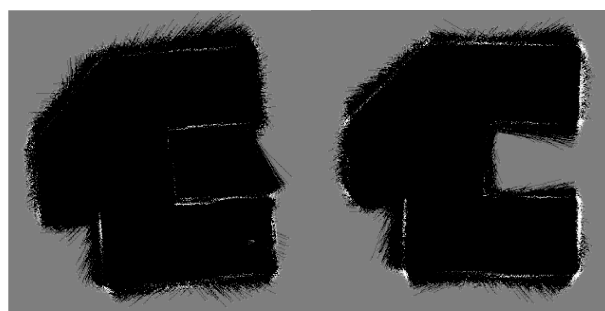


图6 激光雷达视场角对y方向位置不确定性的影响  
Fig.6 Influence of lidar view field angle on y-direction position uncertainty

由激光雷达视场角对环境建图结果的影响(图7)可以看出:由于视场角的增大,2D环境建图结果更完整,同时显示更多建图细节:例如当视场角为2π时,可以完整识别右边矩形障碍物并建图,且白色边界更加清晰;当视场角为π时,识别有缺口,且白色边界线比较模糊,是因为在转弯时存在视觉盲区造成了误差。



(a) 激光雷达视场角为π (a) Lidar view field angle π  
(b) 激光雷达视场角为2π (b) Lidar view field angle 2π

图7 激光雷达视场角对环境建图结果的影响  
Fig.7 Influence of lidar view field angle on environmental mapping results

实验中建图结果为黑白图像,像素格尺寸为5 mm × 5 mm。将图7中不同视场角下的环境建图结果仿真值和图2中标准数字地图的全局尺寸a、

全局尺寸 $b$ 、局部尺寸 $a_1$ 、局部尺寸 $b_1$ 的标准值进行对比,如表1和表2所示。由于视场角的增大,2D环境建图更接近标准数字地图。

表1 激光雷达视场角 $\pi$ 下环境建图和标准数字地图对比结果

Tab.1 Comparison results of environmental mapping and standard digital map under the lidar view field angle of  $\pi$

对比尺寸类型	标准值/mm	仿真值/mm	相对误差/%
全局尺寸 $a$	9 000	9 210	2.33
全局尺寸 $b$	12 000	12 195	1.63
局部尺寸 $a_1$	5 000	4 895	2.10
局部尺寸 $b_1$	4 000	3 925	1.88

表2 激光雷达视场角 $2\pi$ 下环境建图和标准数字地图对比结果

Tab.2 Comparison results of environmental mapping and standard digital map under the lidar view field angle of  $2\pi$

对比尺寸类型	标准值/mm	仿真值/mm	相对误差/%
全局尺寸 $a$	9 000	9 095	1.06
全局尺寸 $b$	12 000	12 150	1.25
局部尺寸 $a_1$	5 000	4 960	0.80
局部尺寸 $b_1$	4 000	3 970	0.75

#### 4.2 激光雷达角分辨率对轮式机器人建图质量的影响研究

为了研究不同激光雷达角分辨率对环境建图过程中轮式机器人位姿及建图质量的影响规律,分别选取角分辨率为 $1^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ 进行研究。与此同时,为了避免其他参数的影响,所有实验均在相同路标和相同路径规划下进行。

由激光雷达角分辨率对其扫描结果的位置误差的影响(图8)可以看出:随着时间变化,位置误差基本围绕一个值上下浮动,整体呈现稳定的趋势;由于出现视觉盲区,导致激光雷达瞬时扫描不到边界及障碍物,出现了突增的情况;随着分辨率的增大,位置误差曲线震荡更加剧烈,突变位置增多,与此同时其扫描结果的最大位置误差由0.8 m增大至1.0 m,这和激光雷达探测光束

变得稀疏,检测到障碍物的概率更小有关。

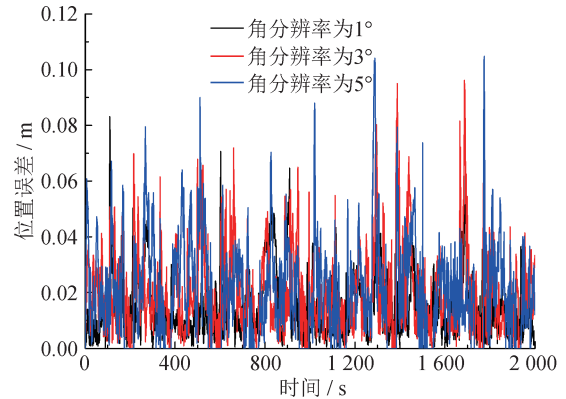


图8 激光雷达角分辨率对其扫描结果的位置误差的影响

Fig.8 Influence of the angular resolution of lidar on the position error of its scanning results

由激光雷达角分辨率对其扫描结果的角度误差的影响(图9)可以看出:随着时间变化,角度误差曲线整体呈现稳定的趋势,由于视觉盲区的出现,导致激光雷达会瞬时扫描不到边界及障碍物,出现了突增的情况;随着角分辨率增大,位置误差曲线震荡更加剧烈,突变位置增多。

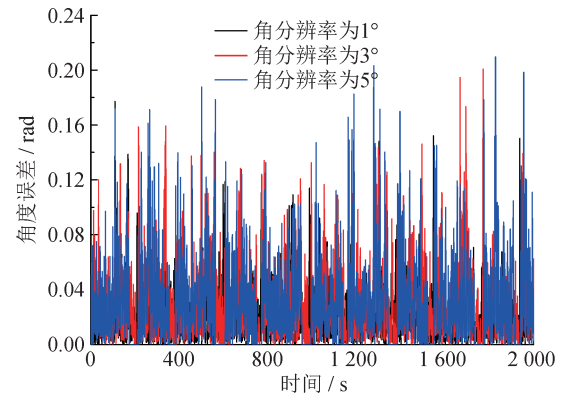


图9 激光雷达角分辨率对其扫描结果的角度误差的影响

Fig.9 Influence of the angular resolution of lidar on the angular error of its scanning results

由激光雷达角分辨率对 $x$ 方向位置不确定性的影响(图10)可以看出:随着时间变化,该方向位置不确定性呈现单峰周期性降低变化趋势;随着角分辨率的增大,激光雷达光束变得稀疏,该方向位置不确定性增大且突变位置更加剧烈。

由激光雷达角分辨率对 $y$ 方向位置不确定性的影响(图11)可以看出,随着时间变化,该方向位置不确定性曲线呈现双峰周期性降低变化趋势;

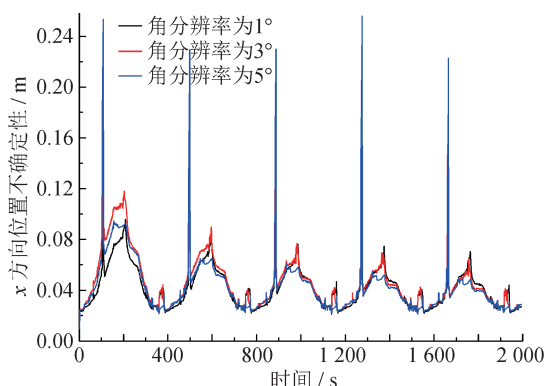


图10 激光雷达角分辨率对x方向位置不确定性的影响  
Fig.10 Influence of the angle resolution of lidar on the x-direction position uncertainty

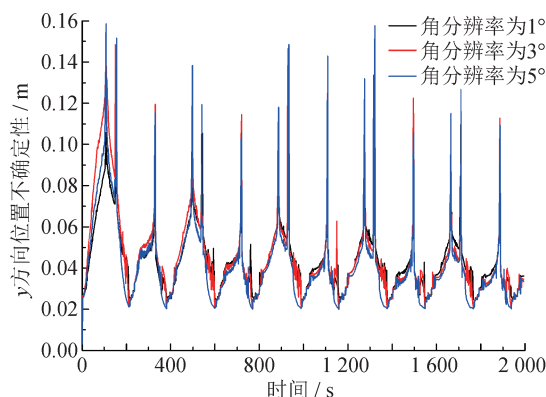


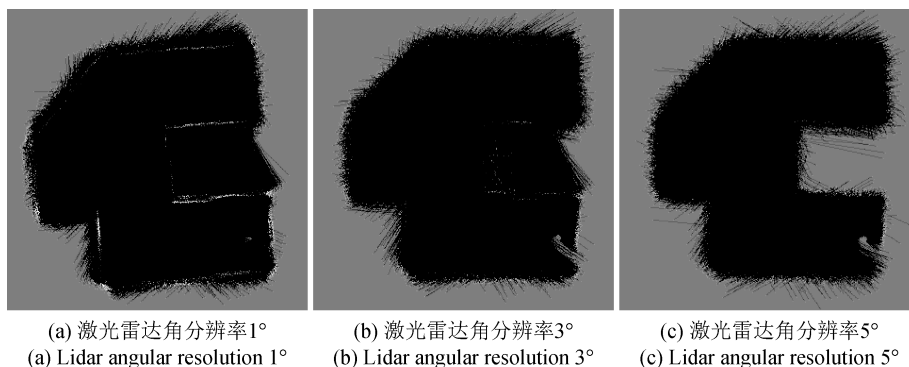
图11 激光雷达角分辨率对y方向位置不确定性的影响  
Fig.11 Influence of the angle resolution of lidar on the y-direction position uncertainty

随着角分辨率的增大，激光雷达光束变得稀疏，该方向位置不确定性增大且突变位置更加剧烈。

由激光雷达角分辨率对环境建图结果的影响(图12)可以看出：由于分辨率的增大，激光雷达探测光束变得更加稀疏，2D环境建图白色边界变得越来越模糊，且右下角处有空白，建图不完整，与此同时噪声越来越多，例如当激光雷达角分辨

率为5°时，大部分边界是模糊的且噪声较大，导致看不清楚白色边界，这和激光雷达探测光束变得稀疏，检测到障碍物的概率更小有关。

结合图12和图2标准数字地图进行全局尺寸a、全局尺寸b、局部尺寸a<sub>1</sub>、局部尺寸b<sub>1</sub>比对，表3~表5可看出，随着激光雷达角分辨率的增大，2D环境建图结果和标准数字地图的误差越大。



(a) 激光雷达角分辨率1° (a) Lidar angular resolution 1°  
(b) 激光雷达角分辨率3° (b) Lidar angular resolution 3°  
(c) 激光雷达角分辨率5° (c) Lidar angular resolution 5°

图12 激光雷达角分辨率对环境建图结果的影响

Fig.12 Influence of lidar angular resolution on environmental mapping results

## 5 结论

为了提升轮式机器人系统的环境建图精度，本文基于机器人运动学模型、传感器模型和融合算法进行机器人系统理论建模，在此基础上通过仿真实验研究了激光雷达性能参数(视场角、角分辨率)对环境建图过程中轮式机器人位姿及建图质量的影响规律，主要结论如下：

①随着时间变化，不同激光雷达视场角、不同激光雷达角分辨率下的轮式机器人的x和y方向

的位置不确定性、角度误差曲线形状相似。x坐标轴方向的位置不确定性曲线呈现单峰周期，y坐标轴方向的位置不确定性曲线呈现双峰周期变化。由于噪声、拐角时视觉盲区的存在，角度误差呈现出震荡的趋势。

②随着激光雷达视场角增大，转弯的时视觉盲区减少，轮式机器人的x和y位置不确定性和角度误差均呈现下降趋势；与此同时，位置不确定性曲线振动频率减小且更趋于圆滑，角度误差曲线振幅变小；2D环境建图结果更加完整，细节更

表3 激光雷达角分辨率为 $1^\circ$ 时环境建图和标准数字地图对比结果

Tab.3 Comparison results of environmental mapping and standard digital map when the angular resolution of LiDAR is  $1^\circ$

对比尺寸类型	标准值/mm	仿真值/mm	相对误差/%
全局尺寸 $a$	9 000	9 210	2.33
全局尺寸 $b$	12 000	12 195	1.63
局部尺寸 $a_1$	5 000	4 895	2.10
局部尺寸 $b_1$	4 000	3 925	1.88

表4 激光雷达角分辨率为 $3^\circ$ 时环境建图和标准数字地图对比结果

Tab.4 Comparison results of environmental mapping and standard digital map when the angular resolution of LiDAR is  $3^\circ$

对比尺寸类型	标准值/mm	仿真值/mm	相对误差/%
全局尺寸 $a$	9 000	9 405	4.50
全局尺寸 $b$	12 000	12 410	3.42
局部尺寸 $a_1$	5 000	4 715	5.70
局部尺寸 $b_1$	4 000	3 755	6.13

表5 激光雷达角分辨率为 $5^\circ$ 时环境建图和标准数字地图对比结果

Tab.5 Comparison results of environmental mapping and standard digital map when the angular resolution of LiDAR is  $5^\circ$

对比尺寸类型	标准值/mm	仿真值/mm	相对误差/%
全局尺寸 $a$	9 000	9 490	5.44
全局尺寸 $b$	12 000	12 625	5.21
局部尺寸 $a_1$	5 000	4 585	8.30
局部尺寸 $b_1$	4 000	3 610	9.75

多,当激光雷达视场角为 $2\pi$ 时,不仅可以完整地识别出右边矩形障碍物,且能更清晰地标出白色边界,但是同时也大大增加了计算时间和成本。

③随着激光雷达角分辨率增大,雷达激光束变得更加稀疏,漏检边界和障碍物概率增大,轮式机器人的 $x$ 和 $y$ 位置不确定性突变位置增多,角

度误差振动幅度变大;虽然整体2D环境建图结果差别不大,但是建图白色边界变得越来越模糊,甚至于在建图右下角处有空白,建图精度低。

综上,基于机器人系统理论模型和仿真实验得出:通过增大激光雷达视场角、减小角分辨率可以提高机器人系统环境建图精度。

### 参考文献

- [1] 任福继,孙晓.智能机器人的现状及发展[J].科技导报,2015,33(21):32-38.  
REN F J, SUN X. The current situation and development of intelligent robots [J]. Technology Herald, 2015, 33 (21): 32-38. (in Chinese)
- [2] SIEGWART R, NOURBAKHSI R, SCARAMUZZA D. Introduction to autonomous mobile robots [M]. MIT press, 2011.
- [3] 江其洲,曾碧.基于深度强化学习的移动机器人导航策略研究[J].计算机测量与控制,2019,27(8):217-221.  
JIANG Q Z, ZENG B. Research on navigation strategies for mobile robots based on deep reinforcement learning [J]. Computer Measurement and Control, 2019, 27 (8): 217-221. (in Chinese)
- [4] 张书亮,谭向全,吴清文.基于多传感器融合技术的室内移动机器人定位研究[J].传感器与微系统,2021,40(8):53-56.  
ZHANG S L, TAN X Q, WU Q W. Research on indoor mobile robot localization based on multi-sensor fusion technology [J]. Sensors and Microsystems, 2021, 40 (8): 53-56. (in Chinese)
- [5] 李永强,唐旭东,李兆凯,等.移动机器人的多传感器信息融合[J].西北工业大学学报,2021.  
LI Y Q, TANG X D, LI Z K, et al. Multi sensor information fusion for mobile robots [J]. Journal of Northwest Polytechnical University, 2021. (in Chinese)
- [6] 冯肖维.基于多传感器信息融合的移动机器人位姿计算方法研究[D].上海:上海大学,2011.  
FENG X W. Research on the pose calculation method of mobile robots based on multi-sensor information fusion [D]. Shanghai: Shanghai University, 2011. (in Chinese)
- [7] 班朝,任国营,王斌锐,等.基于IMU的机器人姿态自适应EKF测量算法研究[J].仪器仪表学报,2020(2):33-39.  
BAN C, REN G Y, WANG B R, et al. Research on IMU based adaptive EKF measurement algorithm for robot pos-



- ture[J]. Journal of Instrumentation, 2020 (2): 33-39. (in Chinese)
- [8] 司现军, 王志良. 移动机器人多传感器信息融合技术综述[J]. 机电工程, 2004, 21 (2): 1-5.  
SI X J, WANG Z L. Overview of multi-sensor information fusion technology for mobile robots [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2004, 21 (2): 1-5. (in Chinese)
- [9] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊, 2009 (11): 32-34.  
PENG D C. The basic principle and application of Kalman filtering [J]. Software Guide, 2009 (11): 32-34. (in Chinese)
- [10] 邹波, 张华, 姜军. 多传感信息融合的改进扩展卡尔曼滤波定姿[J]. 计算机应用研究, 2014, 31 (4): 1035-1038.  
ZOU B, ZHANG H, JIANG J. Improved extended kalman filter attitude determination for multi sensor information fusion [J]. Computer Application Research, 2014, 31 (4): 1035-1038. (in Chinese)
- [11] 杨柏胜, 姬红兵. 基于无迹卡尔曼滤波的被动多传感器融合跟踪[J]. 控制与决策, 2008, 23 (4): 460-463.  
YANG B S, JI H B. Passive multi-sensor fusion tracking based on unscented Kalman filtering [J]. Control and Decision Making, 2008, 23 (4): 460-463. (in Chinese)
- [12] GAN Q, HARRIS C J. Comparison of two measurement fusion methods for Kalman-filter-based multisensor data fusion [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(1): 273-279.
- [13] HESS W, KOHLER D, RAPP H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016: 1271-1278.
- [14] 温秀兰, 宋爱国, 冯月贵, 等. 基于最优位姿集的机器人标定及不确定度评定[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (9): 276-283.  
WEN X L, SONG A G, FENG Y G, et al. Robot calibration and uncertainty evaluation based on optimal pose set [J]. Journal of Instrumentation, 2022, 43 (9): 276-283. (in Chinese)
- [15] 王卫华, 陈卫东, 席裕庚. 移动机器人地图创建中的不确定传感信息处理[J]. 自动化学报, 2003, 29 (2): 267-274.  
WANG W H, CHEN W D, XI Y G. Uncertain sensor information processing in mobile robot map creation [J]. Journal of Automation, 2003, 29 (2): 267-274. (in Chinese)
- [16] 李静, 朱红. 基于激光雷达的室内机器人的建图方法[J]. 人工智能与机器人研究, 2021, 10 (2): 99-106.  
LI J, ZHU H. A mapping method for indoor robots based on LiDAR [J]. Artificial Intelligence and Robotics Research, 2021, 10 (2): 99-106. (in Chinese)

(本文编辑: 郑燕)



第一作者: 崔佳慧 (1996—), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事智能测量及评价领域相关研究。