

激光测距传感器在自主导航小车中的位置标定

罗志锋, 张 轲, 王志刚, 郑 健, 陈易新

上海交通大学激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

摘要 为解决二维(2D)激光测距传感器在自主导航小车中的位置标定问题,提出了一种新的标定方法,首先根据小车直行时的轨迹方程和传感器的姿态信息,求解出传感器在小车中的姿态;然后根据小车原地旋转时传感器、小车控制点的轨迹以及相位关系,计算出传感器在小车中的位置。实验结果表明,该标定方法简便、精确、可靠,标定精度满足小车导航的要求。

关键词 传感器; 激光测距传感器; 自主导航小车; 位置标定; 坐标变换

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.062802

Pose Calibration of Laser Range Finder in Automated Guided Vehicle

Luo Zhifeng, Zhang Ke, Wang Zhigang, Zheng Jian, Chen Yixin

Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract In order to solve the problem of position calibration of two-dimensional laser range finder sensor in automated guided vehicles, a new calibration method is proposed. The attitude of sensors in the vehicle is obtained by solving the trajectory equation and using the sensor attitude information when the vehicle is controlled to move straight. When the vehicle is controlled to spin in one spot, according to the sensor, the trajectories of the vehicle control points and their phase relationship, one can get the position of the sensor in the vehicle. The experimental results show that this calibration method is simple, accurate and reliable, and the calibration accuracy can meet the requirements of vehicle navigation.

Key words sensors, laser range finder; automated guided vehicle; pose calibration; coordinate transformation

OCIS codes 280.3400; 280.3420; 150.5758

1 引 言

基于激光测距传感的自主导航小车(AGV)被广泛应用于柔性生产系统(FMS)中,可以用于现代化工厂或仓库中的柔性搬运,是现代物流系统和工业生产中的关键设备之一^[1]。确定小车在二维工作环境中相对环境参考坐标系的位置、姿态,是保障小车导航质量的最基本环节,因此激光点云匹配算法、激光导航定位算法、导航路径规划算法成为研究热点^[2-6]。

在小车运动模型中,一般将小车的控制点作为小车质点,激光测距传感器与车体刚性连接,两者间的相对姿态和位置固定不变,为了将激光测距传感器的数据从激光测距传感器坐标转换至车体坐标,需要对激光测距传感器的安装参数进行标定。车载多线三维激光测距定位传感器安装参数的标定,通常采用等腰直角三角标定板和正方形标定板来完成^[7]。其他常见的标定方法还包括交互信息最大化的外部自动标定法、激

收稿日期: 2017-01-18; **收到修改稿日期:** 2017-02-15

基金项目: 国防基础科研项目(A0720132003)、上海市重大技术装备研制专项(ZB-ZBYZ-03-11-0485)

作者简介: 罗志锋(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光制造自动化控制方面的研究。E-mail: lzfhuster@sjtu.edu.cn

导师简介: 张 轲(1971—),男,博士,副教授,主要从事智能化激光制造技术方面的研究。

E-mail: zhangke@sjtu.edu.cn(通信联系人)

光摄像头融合的边缘对齐联合自动标定法、测距与图像融合的基于线段外部参数标定法^[8]、标志点平差方法^[9]、拟合平面平差方法^[10]、拟合平面找同名点解算安置参数的方法^[11]。这些方法都是针对三维激光测距仪的位置标定,标定过程中涉及到三维点云的分割和拟合,计算复杂。二维(2D)激光测距传感器结构简单、安装参数少、输出 2D 数据,而上面的标定方法不适用于其安装位置的标定。

在激光导航 AGV 中,2D 激光测距传感器安装参数的获取方法一般如下:利用设计图纸中标注的装配尺寸计算出定位传感器在车上的位置,或者手动测量定位传感器与小车控制点的相对位置,或者安装时默认将定位传感器安装在小车控制点正上方^[12-14]。但由于装配过程存在误差、使用过程会产生变形等,激光测距传感器的实际位置与设计位置有较大偏差;另外,激光测距传感器一般安装在小车的顶部,而小车的控制点是一个虚拟点,手动测量有较大误差。

本文克服上述现有标定技术中存在的不足,提出一种基于小车直线行驶、原地旋转轨迹特征的标定方法,可简便、快速、精准地测量出激光测距传感器在小车中的位置,提高小车位置数据的准确性。

2 基本原理

2.1 激光导航小车系统及定位原理

激光导航 AGV 系统主要由激光测距定位导航传感器、防碰撞传感器、控制系统、运动电机等构成,如图 1 所示。激光导航 AGV 在运行过程中,激光传感器实时输出小车在环境中的位置、姿态,控制系统根据位姿信息和跟踪路径信息计算出小车的轨迹偏差量,然后根据偏差量的大小给电机不同的控制输出量,控制小车沿着预定路径运行。

在激光导航 AGV 的控制过程中,小车的位置、姿态信息决定着纠偏控制系统的输出量,对纠偏结果会造成较大影响,因此实时获得小车在环境中的位置、姿态是小车自动导航、纠偏的前提。

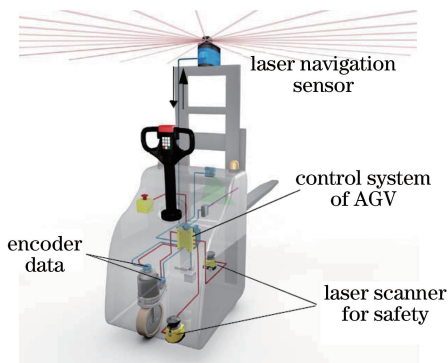


图 1 激光导航 AGV 系统

Fig. 1 Laser-guided AGV system

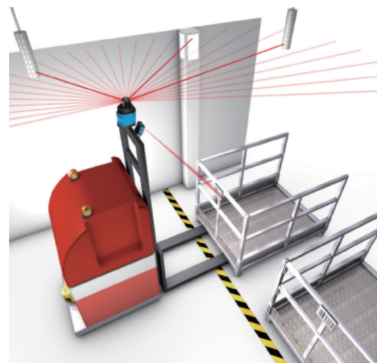


图 2 激光测距定位传感器工作原理

Fig. 2 Working principle of laser range positioning sensor

激光测距定位传感器的工作原理如图 2 所示。为了避免环境中移动障碍物对激光测距定位传感器的遮挡,激光测距定位传感器一般安装在小车的顶端。激光测距定位传感器通过激光束飞行时间测量出各个反光柱到传感器中心的距离^[15],并结合激光扫描检测到的各路标方位角,计算出反光柱在传感器坐标系下的位置坐标^[16]。然后根据视野中反光柱构成的形状判断这些反光柱在地图中对应的编号,结合地图数据中相应编号的反光柱在环境参考系中的坐标,计算出传感器中心点在环境参考坐标系中的位置和姿态。

2.2 激光测距传感器与小车的坐标关系

激光导航小车系统中涉及到三个坐标系:环境参考坐标系,用 (X_w, Y_w, Z_w) 表示;小车坐标系,用 (X_r, Y_r, Z_r) 表示;传感器坐标系,用 (X_s, Y_s, Z_s) 表示,如图 3 所示,其中小车坐标系原点 O_1 为小车控制点,并将 Y_r 所指方向定义为小车的航向;传感器坐标系坐标轴原点为 O_2 ,取 Y_s 为传感器方向; δ 为小车坐标系与激光测距传感器坐标系的夹角; O_1O_2 间的距离为 R ,夹角 θ 为 O_1O_2 连线与小车坐标系 X_r 的夹角; (x, y, β) 表示传感器在环境坐标系下的位置和姿态, (x_r, y_r, β_r) 表示小车在环境参考坐标系下的位置和姿态。

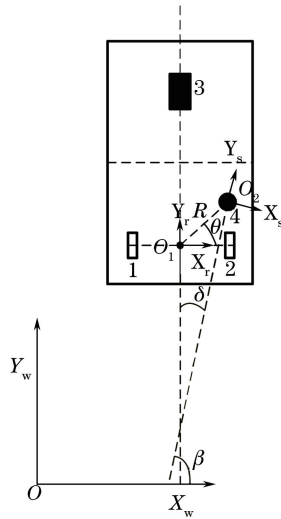


图3 激光导航 AGV 坐标系

Fig. 3 Coordinate system of laser-guided AGV

环境参考坐标系下 $\overrightarrow{O_1O_2}$ 向量可以表示为

$$\overrightarrow{O_1O_2} = \left[R \cos\left(\theta + \beta_r - \frac{\pi}{2}\right), R \sin\left(\theta + \beta_r - \frac{\pi}{2}\right) \right]. \quad (1)$$

小车在环境参考坐标系下的方向为

$$\beta_r = \beta + \delta, \quad (2)$$

由向量关系可知, 小车控制点在环境参考坐标系下的位置为

$$\overrightarrow{OO_1} = \overrightarrow{OO_2} - \overrightarrow{O_1O_2}, \quad (3)$$

可以得到环境参考坐标系下, 激光测距传感器位置、姿态与小车位置、姿态转换关系:

$$\begin{cases} x_r = x - R \cos\left[\beta + \left(\theta + \delta - \frac{\pi}{2}\right)\right] \\ y_r = y - R \sin\left[\beta + \left(\theta + \delta - \frac{\pi}{2}\right)\right] \\ \beta_r = \beta + \delta \end{cases}. \quad (4)$$

激光导航 AGV 中传感器位置参数的标定就是要求解出 δ 、 R 、 θ 三个变量, 建立激光测距传感器与小车的相对坐标关系, 从而将传感器输出的位置数据 (x, y, β) 转换到小车在环境参考坐标系下的绝对位置和姿态 (x_r, y_r, β_r) 。

2.3 小车的运动模型

前端 1 个操控轮、后端 2 个从动轮的小车在没有自动纠偏的情况下, 根据前端主动轮的状态, 小车的运动状态可以分为两种: 一种是前轮角度为 0° , 此时小车作直线运动, 如图 4 所示; 第二种是前轮有一定角度 ω , 此时小车作圆周运动, 如图 5 所示, 其中 r_1 为传感器中心的运动轨迹半径, r_2 为小车转动时控制点的运动半径。

当小车直行的时候, 在不考虑地面不平坦因素的情况下, 小车控制点的运动轨迹为一条直线; 激光测距传感器中心点的运动轨迹与小车控制点运动轨迹平行, 传感器方向 Y_s 与轨迹线保持一定的夹角, 这个夹角即为小车坐标系与激光测距传感器坐标系的夹角 δ 。

当小车转向轮以角度 ω 向前运动时, 假设小车前、后轮中心线的距离为 b , 那么小车转动时控制点运动半径 r_2 为

$$r_2 = \frac{b}{\tan \omega}, \quad (5)$$

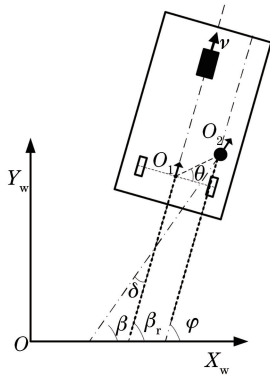


图 4 激光导航 AGV 作直线运动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser-guided AGV moving in a straight line

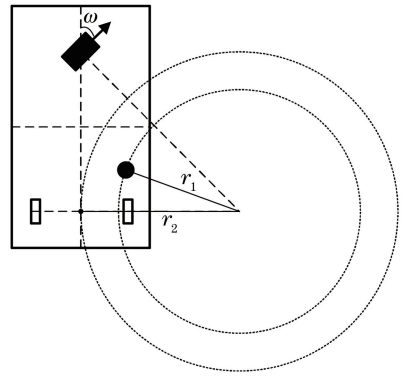


图 5 激光导航 AGV 作圆周运动示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser-guided AGV moving in a circle

此时小车控制点 O_1 的轨迹方程为

$$\begin{cases} x_r = r_2 \cos \beta_r \\ y_r = r_2 \sin \beta_r \end{cases}, \quad (6)$$

式中小车航向角 β_r 如图 4 中所示。由(4)、(6)式可以求解得到传感器中心运动轨迹:

$$\begin{cases} x = \sqrt{(r_2 + R \sin \theta)^2 + (R \cos \theta)^2} \cos(\beta + \delta + \eta) \\ y = \sqrt{(r_2 + R \sin \theta)^2 + (R \cos \theta)^2} \sin(\beta + \delta + \eta), \\ \eta = \arctan\left(-\frac{R \cos \theta}{r_2 + R \sin \theta}\right) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 η 为传感器与小车方向角的补偿参数。

根据传感器中心运动轨迹的方程形式可以看出,当小车转向轮以一定角度 ω 向前运动时,传感器跟随小车一起作圆周运动,运动轨迹半径为

$$r_1 = \sqrt{\left(\frac{b}{\tan \omega} + R \sin \theta\right)^2 + (R \cos \theta)^2}. \quad (8)$$

当 $\omega = 90^\circ$ 的时候,小车与传感器作圆周运动的半径为

$$\begin{cases} r_1 = R \\ r_2 = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

此时小车绕控制点作圆周运动的半径 $r_2 = 0$,即原地旋转;传感器也绕小车控制点作圆周运动,半径为传感器中心到小车控制点的距离。

本文利用小车直行、原地旋转这两种特殊运动状态下的轨迹特性完成标定,首先根据小车直行时的轨迹方程和传感器的姿态信息,求解出传感器在小车中的姿态;然后根据小车原地旋转时传感器、小车控制点的轨迹特征以及小车位置坐标与小车的角度关系特征,计算出传感器在小车中的位置。

3 标定实验

3.1 标定实验方法

标定实验分为两步,第一步 δ 的标定过程具体步骤如下。

1) 将转角轮调到 0° ,让小车直行;记录传感器定位数据 (x, y, β) ,由于传感器测量误差,此时 β 会在较小范围内波动。

2) 小车前行一段距离后停止,绘制传感器定位数据 (x, y) ,并利用最小二乘法拟合 (x, y) 为直线,计算拟合直线的角度斜率角 ψ 和 β 的平均值 β_m 。

3) 计算小车方向与传感器方向矢量之间的夹角 $\delta = \psi - \beta_m$ 。

第二步 R 和 θ 的标定过程具体步骤如下。

1) 将转角轮调到 90° , 让小车原地转动, 记录转动过程中传感器定位数据 (x, y, β) 。

2) 待小车转完一圈后, 将定位数据 (x, y) 利用最小二乘法拟合成圆, 求解拟合圆方程, 其中半径 R 即为需要标定的 R 。

3) 拟合 (β, x) 为余弦曲线, 拟合 (β, y) 为正弦曲线, 根据 (4) 式可知, 两曲线的振幅为 R 、初相为 $(\delta + \theta - \pi/2)$, 根据第一步中标定出的 δ 求解出 θ 。

3.2 标定结果及分析

小车作直线运动时, 传感器输出的轨迹坐标 (x, y) 如图 6 所示。利用最小二乘法拟合的直线方程为

$$y = 1.6433x - 2248.632. \quad (10)$$

利用 (10) 式可以求解出直线与环境参考坐标系 X_w 轴的夹角为 1.0241 rad; 用拟合点到直线的距离量化拟合误差, 结果如图 7 所示, 最大误差为 6.6133 mm, 平均误差为 1.4912 mm。可以看出直线拟合误差均小于 ± 10 mm, 由于传感器定位数据的系统误差为 ± 10 mm, 因此拟合误差在合理范围之内。传感器输出的角度 β 如图 8 所示, 求解出平均值为 1.2450 rad; β 的波动范围较小, 说明小车此时运动轨迹的直线度较好, 这也验证了直线运动的模型。因此可以得到小车坐标系与激光测距传感器坐标系的夹角 $\delta = -0.2209$ rad。

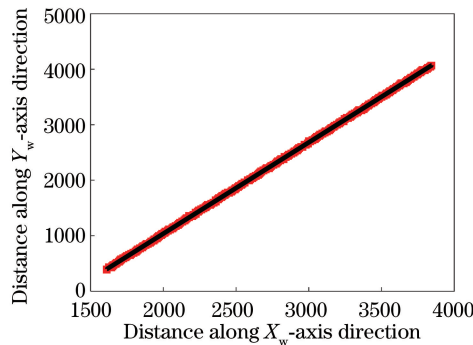


图 6 直行时传感器定位坐标的直线拟合

Fig. 6 Linear fitting of positioning coordinate when sensor is moving in a straight line

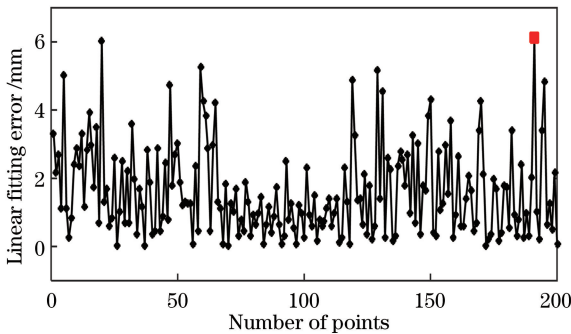


图 7 传感器直行时的直线拟合误差

Fig. 7 Linear fitting error when sensor is moving in a straight line

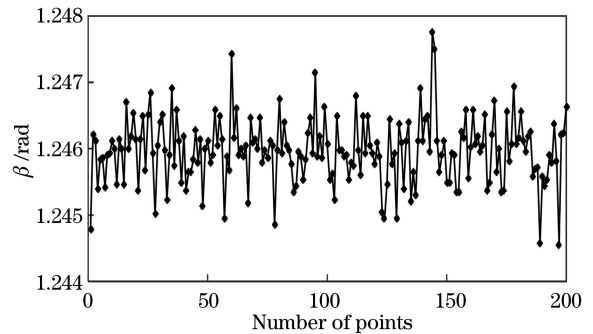


图 8 传感器直行时的 β 值

Fig. 8 β value when sensor is moving in a straight line

小车作原地旋转时, 传感器输出的轨迹坐标 (x, y) 用最小二乘法拟合出的圆如图 9 所示。拟合圆方程为

$$(x - 1628.43)^2 + (y - 387.39)^2 = 336.86^2. \quad (11)$$

拟合误差用拟合点到圆的距离表示, 误差分布如图 10 所示。可以看出, 原地旋转时, 小车圆周运动轨迹误差比较小, 最大误差值为 10.65 mm, 平均误差为 3.38 mm。因为传感器的定位数据的系统误差为 ± 10 mm, 所以拟合圆的误差在合理范围之内, 同时验证了小车圆周运动数学模型的正确性。根据圆的拟合方程, 可以得到传感器中心到小车控制点的距离 $R = 336.86$ mm。

(β, y) 拟合余弦曲线、 (β, x) 拟合正弦曲线分别如图 11, 12 所示。拟合方程分别为

$$y = -388.47 + 338.33\cos(\beta + 1.4959), \quad (12)$$

$$x = 1622.95 + 334.95\cos(\beta + 1.4981). \quad (13)$$

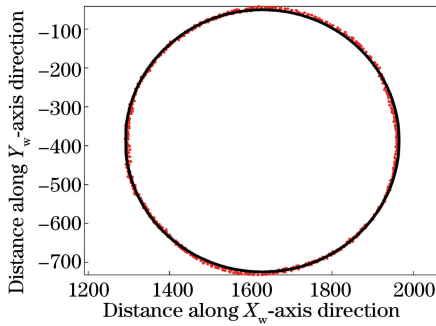


图 9 小车原地旋转时的定位数据圆拟合
Fig. 9 Circle fitting of positioning data when vehicle is moving in a circle

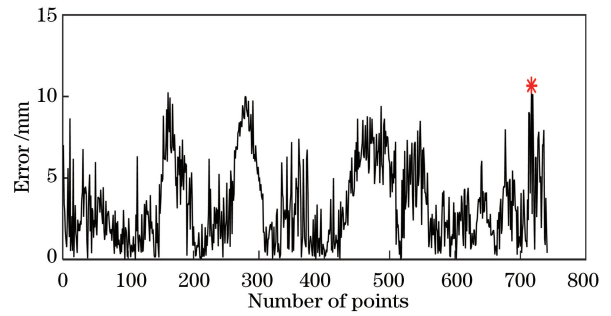


图 10 小车原地旋转时定位数据的圆拟合误差
Fig. 10 Circle fitting error of positioning data when vehicle is moving in a circle

由(4)式可知, (12)、(13)式余弦函数的初相理论上相同, 实际计算得到两函数的初相分别为 1.4959 rad 和 1.4981 rad, 相差 0.0022 rad, 可以看出 x 、 y 方向单独拟合的误差较小。取两初相的平均值 1.4970 rad 作为圆周运动的初相, 故有 $\delta + \theta - \pi/2 = 1.4970$ rad, 求解角度 $\theta = 2.8469$ rad。

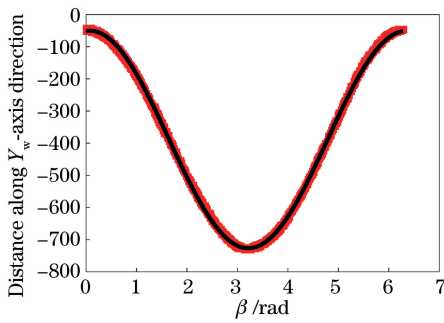


图 11 y 与 β 的曲线拟合
Fig. 11 Curve fitting of y and β

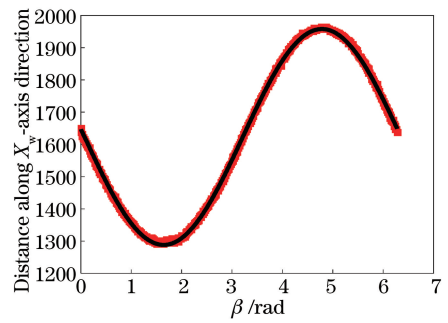


图 12 x 与 β 的曲线拟合
Fig. 12 Curve fitting of x and β

根据以上的标定方法计算得到的传感器安装参数, 由(4)式将传感器定位数据 (x, y, β) 转换为小车在环境参考坐标系下的位置、姿态:

$$\begin{cases} x_r = x - 336.86 \cdot \cos(\beta + 1.4970) \\ y_r = y - 336.86 \cdot \sin(\beta + 1.4970) \\ \beta_r = \beta - 0.2209 \end{cases} \quad (14)$$

为了验证标定结果的准确性, 采集 AGV 转弯时的定位数据, 理论上此时小车位置坐标 x 、 y 值保持不变。传感器实际输出的定位数据如图 13 所示, 可以看出传感器输出的位置信息并不是小车控制点的位置坐标。根据标定得到的位置参数, 将传感器输出的位置坐标转换成小车控制点在环境参考坐标系下的位置坐标值, 如图 14 所示, 可以看出小车控制点坐标基本保持不变, 数据波动范围在 $-10 \sim 10$ mm 之内, 这与传感

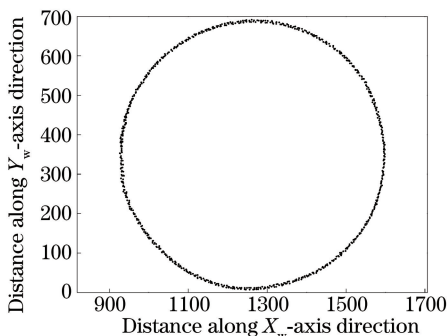


图 13 标定前小车转弯时的 (x, y)

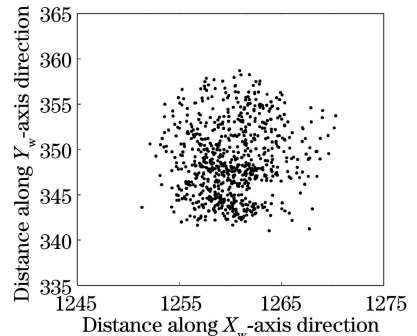


图 14 标定后小车转弯时的 (x, y)

Fig. 13 (x, y) when vehicle is making a turn before calibration

Fig. 14 (x, y) when vehicle is making a turn after calibration

器自身的系统测量误差范围相同,说明标定结果精准、可靠。

4 结 论

研究了激光测距传感器在激光导航 AGV 中安装参数的标定问题,提出了一种传感器安装位置的标定方法。实验结果表明,该标定方法简便、易于操作,能够精确地标定传感器的位置参数,误差范围在 $-10\sim 10$ mm之内,并具有较高的稳健性,满足了 AGV 系统的精度要求。

参 考 文 献

- [1] Wang Wanjun, Zhang Weigong. Research status and development trend of guidance technology for automatic guided vehicles[J]. *Sensors and Microsystems*, 2009, 28(12): 5-7.
王皖君, 张为公. 自动导引车导引技术研究现状与发展趋势[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(12): 5-7.
- [2] Wang Jiao, Yang Linghui, Huang Zhe, *et al.* Indoor integrated navigation algorithm based on photoelectric scanning strapdown inertial navigation system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101201.
王 姣, 杨凌辉, 黄 喆, 等. 基于光电扫描/捷联惯导系统的室内组合导航算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101201.
- [3] Zuo Chao, Lu Min, Tan Zhiguo, *et al.* A novel algorithm for registration of point cloud[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 211-218.
左 超, 鲁 敏, 谭志国, 等. 一种新的点云拼接算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 211-218.
- [4] Zhao Mingbo, He Jun, Luo Xiaobo, *et al.* Data registration of two-view lidar based on improved iterative nearest-point algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 297-306.
赵明波, 何 峻, 罗小波, 等. 基于改进迭代最近点算法的两视角激光雷达数据配准[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 297-306.
- [5] Sun Mingguo, Gao Pengqi, Shen Ming, *et al.* Combined tracking and orbit determination for space objects using laser and optics measurements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071203.
孙明国, 高鹏骐, 沈 鸣, 等. 空间目标的激光和光学两种观测技术联合定位[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071203.
- [6] Hu Shaoxing, Chen Chunpeng, Zhang Aiwu. The application of sncronization location and map creation algorithm in vehicle mobile surveying and mapping system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 156-162.
胡少兴, 陈春朋, 张爱武. 同步定位及地图创建算法在车载移动测绘系统中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 156-162.
- [7] Huang Wuling. Application of lidar in perception of autonomous driving environment[J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2016, 16(10): 3-7.
黄武陵. 激光雷达在无人驾驶环境感知中的应用[J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2016, 16(10): 3-7.
- [8] Nordin P, Andersson L, Nygard J. Sensor data fusion for terrain exploration by collaborating unmanned ground vehicles[C]. 11th International Conference on Information Fusion, 2008: 1-8.
- [9] Kang Yongwei, Zhong Ruofei, Wu Min. Study on calibration method of external parameters of vehicle laser scanner[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008(S3): 254-258.
康永伟, 钟若飞, 吴 隼. 车载激光扫描仪外参数标定方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2008(S3): 254-258.
- [10] Cheng Jinlong, Feng Ying, Cao Yu, *et al.* Extrinsic calibration method for multiple lidars mounted on mobile vehicle[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(12): 89-94.
程金龙, 冯 莹, 曹 毓, 等. 车载激光雷达外参数的标定方法[J]. *光电工程*, 2013, 40(12): 89-94.
- [11] Chu Zhihui, Duan Changlong. Research on calibration of external parameters of vehicle 3D laser scanning system[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2016(2): 55-58.
褚智慧, 段昌龙. 车载三维激光扫描系统外参数标定研究[J]. *北京测绘*, 2016(2): 55-58.
- [12] Zheng Hong, Wang Jingchuan, Chen Weidong. Map-based mobile robot self-localization and navigation system[J]. *Robot*, 2007, 29(4): 397-402.
郑 宏, 王景川, 陈卫东. 基于地图的移动机器人自定位与导航系统[J]. *机器人*, 2007, 29(4): 397-402.

- [13] Han Tonghui. Large-scale transport vehicle platform independent positioning of key technology research[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
韩同辉. 大型运载车平台自主定位关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [14] Xu Shu. SLAM-based mobile robot navigation system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
徐 曙. 基于 SLAM 的移动机器人导航系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [15] Lange M, Detlefsen J. 94 GHz three-dimensional imaging radar sensor for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1991, 39(5): 819-827.
- [16] Yang Cuiling, Dong Zaili, Sun Maoxiang, *et al.* Laser scanning global positioning sensor[J]. Computer Science, 2002, 29(z2): 118-120.
杨翠玲, 董再励, 孙茂相, 等. 激光扫描全局定位传感器的研究[J]. 计算机科学, 2002, 29(z2): 118-120.