

# 单舵轮 AGV 叉车的高精度导航 算法研究与应用

刘志成, 王华龙, 郭威, 马兴录

(青岛科技大学 信息科学技术学院, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 针对单舵轮自动导引车 (AGV, automated guided vehicle) 面向印刷车间复杂的作业环境下传统导航方法定位精度差和路径规划算法生成轨迹不固定的问题, 研究并设计了完整环境地图下的固定路径和提高导航与定位精度的算法; 针对自适应蒙特卡洛定位算法定位精度达不到作业要求, 采取了改进的 Cartographer-SLAM 算法与 PID 算法结合控制循迹的方法, 大大提高了定位导航精度; 针对常规导航框架下的路径规划算法会由于 AGV 车避障行为而改变局部路径, 从而改变导航过程中的全局路径, 导致在狭窄车间环境下会发生碰撞的问题, 设计了生成导航路径点的算法, 生成由直线和弧线轨迹组成的固定路径, 以用于 AGV 叉车的 PID 控制循迹, 实现了固定路径的规划; 实践证明, 该方法解决了单舵轮 AGV 叉车在车间环境下采用传统导航方法出现的问题, 提高了安全性和可控性, 工作效率也随之提升。

**关键词:** 高精度导航; 路径规划; 固定路径; 避障; PID 控制循迹

## Research and Application of High Precision Navigation Algorithm for Single Steering wheel AGV Forklift

LIU Zhicheng, WANG Hualong, GUO Wei, MA Xinglu

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Aiming at the poor positioning accuracy of traditional navigation methods and unfixed trajectory generated by path planning algorithm for single-wheel automated guided vehicle (AGV) in complex working environment of printing shop, a fixed path under complete environment map and an improve navigation and positioning accuracy algorithm were studied and designed. As the localization accuracy of adaptive Monte Carlo localization algorithm does not meet the requirements of the operation, the improved Cartographer-SLAM algorithm combined with PID algorithm is adopted to control the tracking, greatly improving the localization and navigation accuracy. The path planning algorithm under the conventional navigation framework will change the local path due to the obstacle avoidance behavior of AGV vehicles, thus changing the global path in the navigation process and resulting in collisions in the narrow workshop environment, the generating navigation path point algorithm is designed to generate the fixed path composed of straight and arc trajectories for PID control tracking of AGV forklift trucks, the fixed path planning is realized. Experiments show that this method solves the problem of traditional navigation methods in the workshop environment of single-wheel AGV forklift, improves safety and control ability, and work efficiency.

**Keywords:** high-precision navigation; path planning; fixed path; obstacle avoidance; PID control tracking

### 0 引言

随着工业自动化技术的不断发展, 越来越多的工厂车间开始向智能化工厂转型。其中表现最突出的是开始使用 AGV 代替以往传统的人力搬运。AGV 可以根据预设的路径和任务自主导航、搬运和运输物料<sup>[1]</sup>。AGV 的高精度导航技术一直是制约其应用的瓶颈之一<sup>[2-3]</sup>。目前即时定位与地图构建 (SLAM, simultaneous localization and mapping) 已经成了 AGV 车主流导航技术, 但是传统 SLAM 导航技术并不能适用于任何场景。比如, 在实际应用中, AGV 需

要在复杂、动态的工厂环境中进行精确定位和路径规划, 以保证搬运任务的准确和高效完成。此外, 不同类型的 AGV 在导航算法上也存在差异<sup>[4]</sup>。对于 SLAM 导航的机器人, 一些学者对其导航定位的关键技术进行了深入研究。针对在使用传统蒙特卡洛定位算法进行全局定位时存在的粒子退化以及收敛数据较慢等问题, 文献 [5] 中对传统蒙特卡洛定位算法进行改进, 在运动过程中利用扩展卡尔曼滤波来估计位姿, 同时在重采样过程中采用自适应方法调整粒子数量, 从而提高了粒子的收敛速度以及定位的稳定

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2023-10-10。

基金项目: 国家自然科学基金(62201314); 山东省自然科学基金(ZR2020QF007)。

作者简介: 刘志成(1998-), 男, 硕士。

通讯作者: 马兴录(1970-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 刘志成, 王华龙, 郭威, 等. 单舵轮 AGV 叉车的高精度导航算法研究与应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 307-314, 321.

性<sup>[5]</sup>。文献 [6-7] 中利用深度卷积神经网络对激光雷达的数据进行处理,提高了自动引导小车的室内定位精度<sup>[6-7]</sup>。文献 [8] 中提出基于 GSOM 神经网络的仿生定位算法,通过 GSOM 神经网络构建环境的拓扑地图,再通过激光雷达采集的环境信息对位置细胞进行激活响应,从而计算出机器人的位姿,实验表明该方法有效地提高了定位精度<sup>[8]</sup>。本文所提到的单舵轮 AGV 叉车是一种广泛应用于工厂车间的 AGV 类型,其导航算法相比其他类型的 AGV 更加复杂和精细。

因此,本文将改进的激光 SLAM 导航技术用在单舵轮 AGV 叉车上,旨在实现单舵轮 AGV 的高精度导航,探索其在实际生产中的应用价值。首先,本文将对单舵轮 AGV 叉车的运动学和导航系统进行介绍,并分析其导航算法的特点和难点。接着,本文将结合实际案例,提出一种基于激光雷达的高精度导航算法,以解决在工厂环境中的复杂导航问题。最后,本文将对所提出的导航算法进行实验验证,并比较实验结果与传统算法在导航精度、效率等方面的差异,以验证算法的可行性和优越性。

### 1 单舵轮 AGV 模型及导航系统分析

单舵轮 AGV 采用单个舵轮作为驱动方式,它具有较高的机动性和灵活性,在狭窄通道和复杂环境中具有优势。由于单舵轮 AGV 的运动模型特殊,需要解决路径规划、位置定位和姿态调整等问题。

#### 1.1 单舵轮 AGV 运动学模型

单舵轮 AGV 叉车的运动学模型是导航和控制算法设计的基础,可以描述其运动状态和运动规律。通常采用非完整约束系统的方法进行建模。该车主体为三轮式,由一个主舵轮和两个从动轮组成。此外,AGV 底盘四周还安装了万向辅助轮,用于辅助行走和提高稳定性<sup>[9]</sup>。本文研究的单舵轮 AGV 叉车主要用于印刷车间复杂环境下的货物搬运,并需要将货叉伸进生产机器内取货,因此需要极高的定位精度,实测需要达到±20 mm 以下。该 AGV 底盘学模型如图 1 所示。

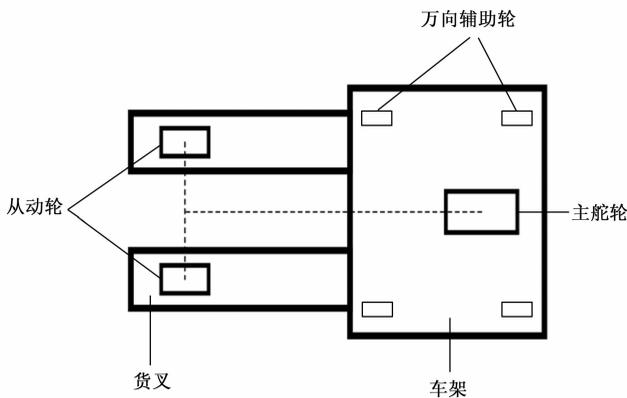


图 1 AGV 底盘模型

如图 1 所示,叉车式 AGV 具有优秀的驱动力,容易转

弯,控制性能良好,广泛应用于复杂的车间环境中,可以提高运输效率。本文为了分析叉车式 AGV 的运动学模型,将图 1 所示 AGV 底盘模型加以简化,以此来推导该 AGV 的运动学模型,简化后如图 2 所示为 AGV 运动学模型。

如图 2 所示,其中 A 为主舵轮, B 和 C 为从动轮,  $b$  为此 AGV 的轴距,即舵轮到从动轮之间的距离,  $d$  为半轴距,即两个从动轮距离的一半,  $r$  为 AGV 车行走过程中的瞬时回转半径。设 AGV 行走过程中的瞬时运动角速度为  $\omega$ , AGV 运动过程中的瞬时线速度为  $v_{AGV}$ , AGV 运动过程中的舵轮瞬时转动速度为  $V$ , AGV 运动过程中的舵轮瞬时偏转角为  $\theta$ 。由几何学推导可得出 AGV 线速度、转弯半径以及 AGV 角速度公式:

$$v_{AGV} = v * \cos\theta \tag{1}$$

$$r = \begin{cases} \frac{b}{\tan\theta} & (\theta > 0) \\ -\frac{b}{\tan\theta} & (\theta < 0) \end{cases} \tag{2}$$

$$\omega = \frac{v_{AGV}}{r} = \begin{cases} \frac{(v * \sin\theta)}{b} & (\theta > 0) \\ -\frac{(v * \sin\theta)}{b} & (\theta < 0) \end{cases} \tag{3}$$

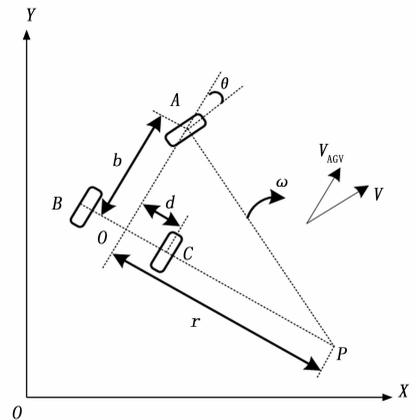


图 2 AGV 运动学模型

假设单舵轮 AGV 车在  $\Delta t$  时间内由 M 点移动到 N 点,其运动示意图如图 3 所示。在 X-O-Y 坐标系中,设 AGV 车在运动过程中车体中心与 X 轴之间的偏向角为  $\alpha$ 。

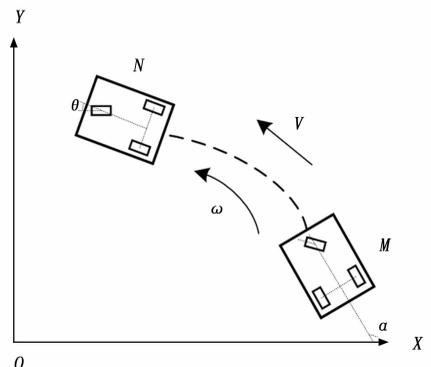


图 3 AGV 运动示意图

由图 3 可知, 若已知 AGV 车起始位置, 则可求移动 AGV 在一个  $\Delta t$  时间内从  $M$  点到达下一个目标点  $N$  的坐标。可得如下公式。

$$x_N = x_M - \frac{b * \sin\alpha}{\tan\theta} + \frac{b * \sin\left(\alpha + \frac{v * \Delta t \sin\theta}{b}\right)}{\tan\theta} \quad (4)$$

$$y_N = y_M + \frac{b * \cos\alpha}{\tan\theta} - \frac{b * \cos\left(\alpha + \frac{v * \Delta t \sin\theta}{b}\right)}{\tan\theta} \quad (5)$$

$$\alpha_N = \alpha_M + \frac{v * \Delta t * \sin\theta}{b} \quad (6)$$

利用公式 (4) ~ (6), 通过微积分的思想, 只需计算极短时间  $\Delta t$  的  $x$ 、 $y$ 、 $\alpha$  的值, 并累加起来, 就能计算出 AGV 叉车的里程计数据, 从而获取任意时刻 AGV 叉车的位姿, 并以 /odom 的话题发送到整个 ROS 系统的各个节点。这个运动学模型可以用来计算车辆在不同控制输入下的运动状态, 例如给定舵轮和车轮的转动速度, 可以计算车辆的位置和姿态。同时, 这个模型也可以用于路径规划和控制算法的设计<sup>[10]</sup>。

### 1.2 单舵轮 AGV 导航系统分析

导航技术是 AGV 的核心, 其中高精度的定位是 AGV 导航的必要前提<sup>[11]</sup>。在单舵轮 AGV 导航中, 转向精度是一个重要问题, 因为只有一个舵轮用于转向, 转向精度可能限制导航的准确性。其次, 姿态调整也是一个挑战, 特别是在需要快速转向或在平坦地面行驶时, 可能出现姿态不稳定或不平衡的情况。最后, 在路径规划方面, 需要考虑到单舵轮 AGV 的运动模型, 设计适合其特性的路径规划算法, 以生成安全高效的导航路径。针对这些挑战和问题, 需要研究和优化适用于单舵轮 AGV 的导航算法和控制策略, 以提高导航的精度、稳定性和安全性。

#### 1.2.1 导航系统介绍

传统的导航系统通常采用轮式编码器和地磁传感器来实现车辆的定位和导航<sup>[12]</sup>。然而, 在实际工厂环境中, 受到地面情况、环境干扰等因素的影响, 这种传统的导航系统往往无法满足高精度定位和导航的要求。因此, 本文提出了一种基于激光雷达的导航系统。如图 4 所示为 AGV 激光 SLAM 导航框架图。

基于激光雷达的导航系统可以分为 3 个部分: 激光雷达扫描系统、自主定位和建图系统、路径规划和控制系统<sup>[13]</sup>。首先, 激光雷达扫描系统是指通过激光雷达扫描工厂环境并获取环境的三维信息。激光雷达可以快速地扫描并测量环境中的物体, 然后将数据转化为点云形式。这些点云数据可以提供环境的三维信息, 包括物体的位置、形状、大小等; 其次, 自主定位和建图系统是指利用激光雷达扫描的数据进行自主定位和建图。自主定位是指车辆利用传感器信息, 确定自身在环境中的位置和朝向。建图是指车辆利用扫描的数据, 构建环境的三维模型。最后, 路径规划和控制系统是指根据车辆的当前位置和目标位置, 利用路径规划算法生成最优路径, 并控制车辆沿着规划好

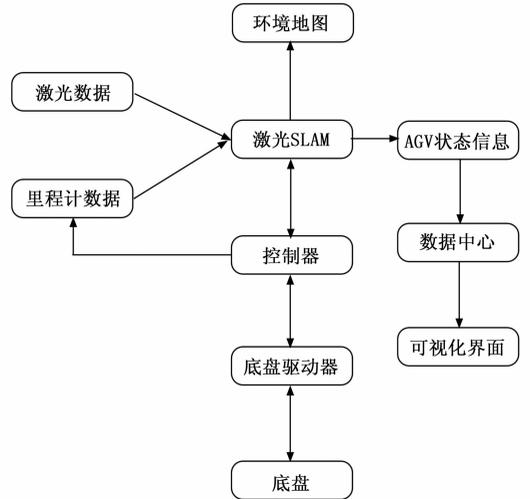


图 4 AGV 激光 SLAM 导航框架图

的路径运动。控制系统则根据规划好的路径和当前车辆的状态, 调节车辆的速度和方向, 保证车辆的稳定性和安全性。

#### 1.2.2 导航系统的特点和难点分析

首先, 由于单舵轮 AGV 车的运动特点, 其导航算法需要考虑车辆的前进方向和转向控制。传统的路径规划算法往往只考虑车辆的位置和目标位置, 而忽略了车辆的运动特点<sup>[14]</sup>。因此, 在设计导航算法时, 需要考虑车辆的运动特点, 如舵轮的转向角度、车身的姿态等因素, 以实现车辆的高效、精准的控制。其次, 工厂环境的复杂性也是单舵轮 AGV 车导航算法的难点之一, 工厂环境中存在许多动态和静态的障碍物, 如人员、设备、货物等。这些障碍物的位置和状态都是不确定的, 因此需要利用高精度的传感器和先进的算法来感知和规避障碍物, 以保证车辆的安全和稳定性。最后, 激光雷达的成本较高也增加了系统的造价。综上所述, 在设计基于激光雷达的导航算法时, 需要考虑成本和复杂度的问题, 以实现良好的导航精度和系统可靠性, 此外导航算法需要具备较高的实时性和鲁棒性, 以应对突发情况和环境变化, 确保车辆的安全和稳定性。

综上所述, 单舵轮 AGV 车导航算法的特点和难点主要包括考虑车辆的运动特点、感知和规避障碍物、成本和复杂度问题、实时性和鲁棒性问题等。

## 2 AGV 导航系统设计

导航的主要功能是实现 AGV 车辆的自主导航和路径规划。如图 5 所示是导航系统的总体路线图。

AGV 将获取的激光雷达数据和里程计数据进行融合后输入到 Cartographer 算法进行建图, 将建好的地图加载到 AGV 系统, AGV 在先验地图的基础上进行定位和路径规划, 然后由 PID 算法控制 AGV 进行路径跟踪实现自主导航, 在自主导航的过程中会不断进行定位, 以确保定位准确。在行走过程中由超声波传感器实时探测周围的环境,

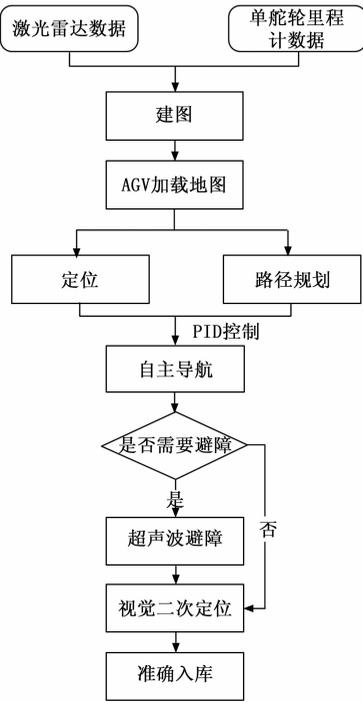


图 5 总体路线图

若是检测到障碍物则进行避障，若没有障碍物则继续前进，直到目标点库位附近开启视觉传感器获取目标托盘，解算出目标托盘的位置后调整 AGV 位姿实现精准叉取托盘。

### 2.1 改进 Cartographer-SLAM 算法的导航技术

用于 AGV 导航的技术有激光扫描、视觉导航、磁带跟踪和无线射频识别等<sup>[19]</sup>。每种技术都有其优缺点，选择哪种技术取决于特定需求。经过大量分析和测试并且结合印刷厂车间作业要求，本文选用激光 SLAM 导航技术，并且选用 Cartographer-SLAM 算法进行 AGV 车的建图定位和导航。本文将 Gmapping、Hector、Karto、Cartographer 等几种 2D 激光 SLAM 算法分别安装到了工控机上并在实际 AGV 车上进行了测试，并将 4 种算法建的图进行了对比。如图 6 中 (a)、(b)、(c)、(d) 分别是 Gmapping、Hector、Karto、Cartographer 等算法实际效果图。得出各个算法的缺点，Gmapping 算法的缺点是不适合大场景下的建图，因为 Gmapping 算法在建图过程中每个粒子都携带一幅地图，因此在构建大地图时所需内存和计算量都会增加，这样会导致建图效果大大下降，因此不适合大场景下建图<sup>[15-16]</sup>；Hector 算法建图在机器人快速转向时很容易发生错误匹配，建出的地图发生错位，原因主要是优化算法容易陷入局部最小值，并且没有回环检测；Karto 算法无法实时构建子图，耗费时间；Cartographer 算法适应于低成本激光雷达，加速回环检测，实时性强，但是在几何对称环境中，易回环出错<sup>[17-18]</sup>。通过对比，Cartographer 算法比其他算法建图精度高。因此，结合印刷车间复杂的环境条件下，Cartographer 算法更加适合本文所需要求。

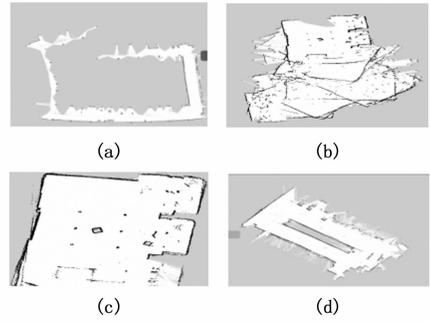


图 6 各算法建图效果

本文将激光雷达采集的地图数据进行去噪、滤波和特征提取等预处理操作后，融合 AGV 轮速传感器获得的轮速信息，通过一致性检测和校正方法，实现对轮速的准确测量和融合。在激光雷达数据和轮速信息融合之前对轮速信息进行处理，本文采用了误差补偿法对轮速信息做处理，在融合轮速信息时，可以根据各个传感器的性能、信噪比等因素为其分配权重。误差补偿法是一种基于误差模型的数据融合方法，通过建立传感器的误差模型，对测量值进行误差补偿，从而提高融合结果的准确性。在融合轮速信息时，可以根据各个传感器的特性、温度漂移等因素建立误差模型。设有  $n$  个轮速传感器，每个传感器的测量值为  $v_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ ，误差模型为  $e_i(v_i) (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ ，则经过误差补偿后的轮速信息  $v_c$  为：

$$v_{c-i} = v_i - e_i(v_i) (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

然后，可以将经过误差补偿的轮速信息  $v_{c-i}$  进行加权平均融合，得到最终的融合结果。综合上述两种方法，可以得到融合后的轮速信息：

$$v_f = \frac{\sum \{w_i * [v_i - e_i(v_i)]\}}{\sum w_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)} \quad (8)$$

激光扫描传感器可以提供高精度的地图信息和障碍物信息，而轮速传感器可以提供车辆的运动信息。将两者进行融合可以得到更加准确的导航信息。常用的融合方法包括加权平均法、卡尔曼滤波等，本文用了卡尔曼滤波方法。卡尔曼滤波是一种递归贝叶斯滤波方法，可以用来融合多个传感器的信息，并估计系统状态。设  $z_t$  为时刻  $t$  的测量值， $x_t$  为系统状态， $u_t$  为控制量， $w_t$  和  $v_t$  为噪声， $F$  为状态转移矩阵， $H$  为观测矩阵， $Q$  为过程噪声协方差， $R$  为测量噪声协方差， $K$  为滤波增益公式， $P$  是先验估计协方差，是滤波的中间计算结果，则卡尔曼滤波的迭代公式为：

$$x_{t-1} = F * x_{(t-1)} + B * u_t + w_t \quad (9)$$

$$z_t = H * x_t + v_t \quad (10)$$

$$P_t = F * P_{(t-1)} * F^T + Q \quad (11)$$

$$K_t = P_t * H^T * (H * P_t * H^T + R)^{-1} \quad (12)$$

$$x_t = x_{t-1} + K_t * (z_t - H * x_{t-1}) \quad (13)$$

$$P_t = (I - K_t * H) * P_{t-1} \quad (14)$$

经过上述过程，将激光雷达扫描数据和处理后的轮速信息进行融合后输入 Cartographer 算法进行建图，其融合

前后由传感器获取的环境特征信息对比效果如图 7 所示。

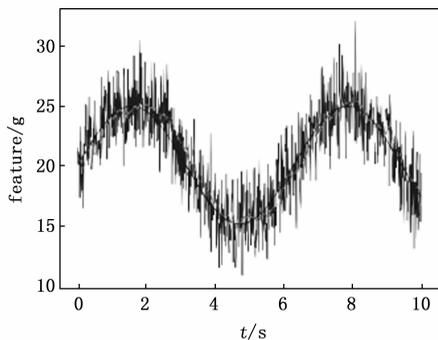


图 7 融合对比效果图

如图 7 所示, 假设环境特征点真实值由黑色光滑曲线表示, 激光雷达获取到的数据由黑色锯齿形曲线表示, 灰白色锯齿形曲线表示经过融合后获得的数据, 可以看到经过卡尔曼融合, 相比黑色锯齿形曲线, 灰白色锯齿线相对真实值的误差已经大幅度减小了。如图 8 所示为使用融合轮速信息前后效果对比图, 可以明显看到建图的精度相对于之前地图精度有很大的提升。

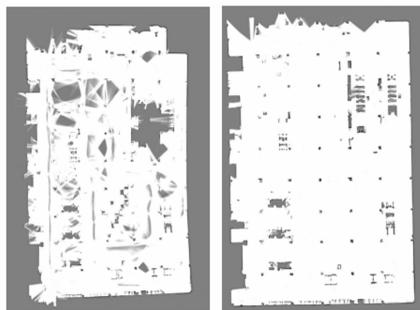


图 8 改进前后建图效果对比图

Cartographer 做建图算法的时候生成的地图由两部分组成。第一部分是生成一个全局地图, 第二部分是生成基于局部坐标系的子图, 其中生成的全局地图是由子图组合而成, 当识别出回环时对其进行校正。生成子图是一个迭代过程, 将激光雷达扫描的点云与子图坐标系进行比较<sup>[20]</sup>。本文主要研究用 Cartographer 算法来实现纯定位, 一般移动机器人大多采用蒙特卡洛定位算法, 其原理是基于粒子在空间中的分布进行定位的, 经常会出现定位丢失或者误差太大的问题<sup>[21]</sup>。传统 Cartographer 算法定位的原理是先读取 pbstream 格式的先验地图, 其中可以读取到里程碑, 子图等信息<sup>[22]</sup>。其次在 AGV 定位过程中会通过激光雷达扫描周围的环境信息, 将激光雷达扫描的每一帧数据都放到先验地图的子图中与其进行匹配 (Scan To Map)<sup>[23]</sup>, 这样计算量大, 而且经过大量实验证明, 在长廊或者相似的环境下, 会因为激光雷达的某一帧数据与相似的地方匹配而出现定位丢失的问题, 这样会大大降低 AGV

的工作效率, 而且还会出现定位错误带来的事故。

本文将传统的 Cartographer 定位算法进行改进。在改进前先对激光雷达的坐标进行分析, 当激光雷达作为坐标系时, 得到的坐标是以激光雷达自身为中心, 需要转化到世界坐标系下。假设雷达扫描端点的某一个点以  $S(S_x, S_y)$  表示, 那么它在世界坐标系的位置和姿态为  $U = (U_x, U_y, U_\theta)$ , 可通过  $U$  转化矩阵  $T_u$  将  $S$  转化到世界坐标系中, 见公式 (15)

$$T_u s = \begin{bmatrix} \cos U_\theta & -\sin U_\theta \\ \sin U_\theta & \cos U_\theta \end{bmatrix} S + \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \end{pmatrix} \quad (15)$$

Cartographer 算法可以将环境划分为栅格单元, 每个栅格单元一共有 3 种状态: 占有、空闲、未知。如图 9 所示为栅格示意图, 在栅格中黑色表示占有, 白色表示空闲, 灰色表示未知通过激光雷达对周围环境进行扫描, 对检测范围内的网格根据占有概率将其判定为占有或空闲, 通过机器人的移动对未知网格进行探索。把浅灰色点当作激光雷达中心, 扫描的环境信息用图 9 表示。

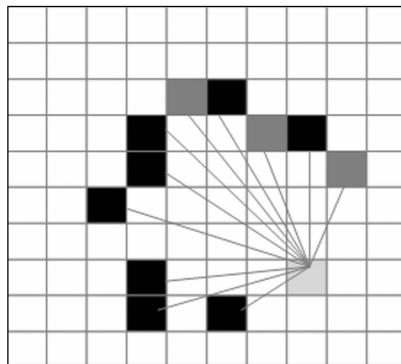


图 9 栅格地图

根据图 9 所示, 将 Scan-To-Map 改为 Map-To-Map 的具体改进方法是将最近的几帧雷达扫描数据缓存起来建立一个子图, 若子图  $m$  是由雷达数据  $l_0$  至  $l_i$  组成, 用  $N$  表示对应帧包括的雷达点数目, 则  $l_0$  至  $l_i$  包含的激光雷达点数总共为:

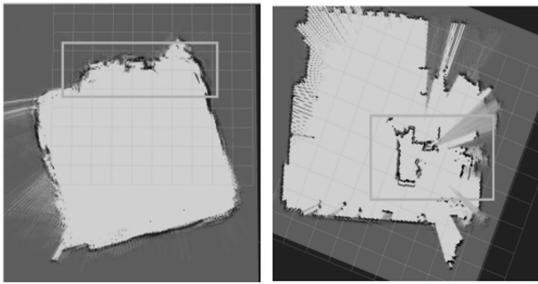
$$N_{l_0:l_i} = N_{l_0} + N_{l_1} + N_{l_2} + \dots + N_{l_i} \quad (16)$$

由此构建的子图  $m$  总共包含激光点数为:

$$N_m = N_{l_0:l_i} \quad (17)$$

将式 (17) 运算后的结果建立一个新的子图  $m$ , 此新子图  $m$  去和先验地图进行匹配, 这样的方式称为 Map To Map 的匹配方式。Map To Map 匹配方式的好处首先是可以减少计算量, 其次是因为建立的子图中含有不止一帧激光雷达扫描数据, 其含有的环境信息量较大, 可以匹配的范围较广, 所以用子图去匹配定位的方式可以有效地解决因环境相似而导致的定位丢失的问题。如图 9 (a)、(b) 是 Cartographer 算法改进前和改进后的效果图。

图 10 (a) 中矩形框内为激光数据的每帧与先验地图进行匹配, 此时可能会出现因相似环境匹配错误的情况; 图



(a)改进前效果 (b)改进后效果

图 10 Cartographer 改进前后效果图

10 (b) 中矩形框内为激光雷达当前扫描的  $N$  帧数据缓存起来形成一个局部子图, 通过该子图与先验地图进行匹配。

### 2.2 AGV 路径规划的研究

AGV 路径规划可以看作机器人工作环境与运动规划的“桥梁”, 是移动机器人能够正常运行的重要内容。路径规划主要解决的问题是: 机器人可以从起始状态沿着规划好的路径运动到指定目标位置并完成任务; 机器人在动态的环境中运动时遇到障碍物时可以做出响应<sup>[24]</sup>。

针对 AGV 的导航, 市面上大多 AGV 导航路径是随时可变的, 也就是机器人根据环境地图模型信息通过相关的路径规划算法计算实现自主路径规划的方式, 这种随时可变的路线不适合 AGV 在复杂有限的印刷车间环境下作业。本文为了适应印刷车间环境解决 AGV 路径随时可变的问题, 自己设计了固定路径生成的算法, 此算法可以生成固定的 AGV 路径<sup>[25]</sup>。具体方法是将 AGV 导航的路径表示成带有属性的轨迹, 比如直行段、左转弯和右转弯等轨迹, 每段轨迹上带有速度、加速度、任务 (AGV 在该段轨迹上要执行的任务) 等属性。下面如图 11 所示是本文设计的路径点生成算法流程图。根据路径的起始点和目标点, 生成一条由若干条相互垂直或平行的线段组成的路径, 并根据这些路径的属性生成一系列的导航点辅助叉车导航。具体实现流程如图 11 所示。

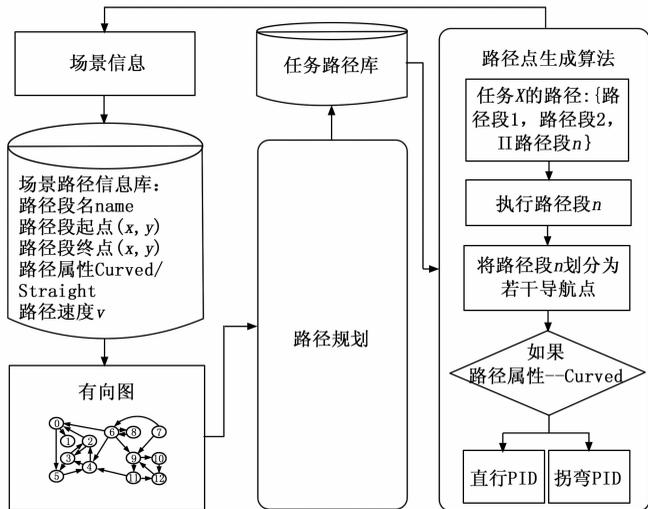


图 11 路径点生成算法设计流程图

首先根据场景信息, 为 AGV 车订制一系列的路径, 并生成路径信息库, 库中每段路径都有自己的信息: 名字, 起点, 终点, 属性以及速度。然后根据场景路径信息库, 将其进行抽象并生成一幅有向图。最后在执行任务过程中, 采用路径点规划算法, 将任务  $x$  包含的每一段路径都划分成导航点, 如果路径段的属性为转弯, 则采用拐弯 PID 导航算法进行导航, 如果路径段的属性为直线, 则采用直线 PID 导航算法进行导航。最终能够以极小的误差, 并且高效的完成导航任务。具体来说将用数据库中的 3 个表来表示, 其中表 1 专门用来表示 AGV 导航的坐标点, 表 2 专门用来表示 AGV 导航的路径段, 表 3 专门用来表示 AGV 导航的任务。

表 1 AGV 导航坐标点 cm

ID	$x$	$y$	Description
1	-0.239	-0.356	叉车初始点
2	2.838	-0.196	直线出库点
3	2.922	1.131	出库后北侧
4	2.596	9.476	出库后南侧
5	2.632	8.125	南东
6	2.543	-2.143	南东左转
7	2.556	-1.124	南西

表 2 AGV 导航路径段

ID	$P_s$	$P_e$	Type	Speed/(m/s)	Description
1	1	2	0	0.4	出库直行
2	2	3	2	0.2	出库后左转
3	3	4	0	0.4	直行到预备点
4	4	5	12	0.4	入库
5	5	6	22	0.2	出库
6	4	7	0	0.4	直行
7	7	8	11	0.4	入库
8	8	5	21	0.2	出库

表 3 AGV 任务表

ID	$P\_ID$	Act	Description
1	1	0	前往磨切机 1 库位 1 又取货物并出库
1	2	0	
1	3	0	
1	4	1	
1	5	0	
1	6	0	
1	7	2	
1	8	0	

上述所列表为测试过程中的部分数据, 表 1 表示 AGV 导航过程中的坐标点,  $x$ 、 $y$  分别表示横纵坐标; 表 2 表示由坐标点组成的导航路径段, 其中  $P_s$  和  $P_e$  分别表示路径段上的起始点和终点, 这两点分别在表 1 中遍历寻找, Type 表示直行、正向左转、正向右转、反向左转、反向右

转、倒退等动作, Speed 表示不同路径段上有不同的速度; 表 3 表示 AGV 所需要执行的任务, 其中 ID 表示任务的序号, 此时执行 ID 为 1 的任务, P\_ID 表示执行任务过程中的导航路径段, 在表 2 中遍历寻找, Act 表示 AGV 双叉的状态, 0 表示无动作, 1 表示叉子上升, 2 表示叉子下降。

如图 12 是用本文设计的路径点生成算法生成的车间中的固定路径, 可以看出该 AGV 行走的路径是由多条首位相连的轨迹相连而成, 并且路径都是由直线段和左右转弯的弧线组成。

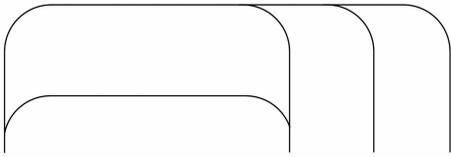


图 12 AGV 路径示意图

### 2.3 基于 PID 算法的路径跟踪

有了定位与路径规划, 接下来就是 AGV 的自主导航了。本文采用在上述规划的固定路径上进行导航, 其自主导航方式采用改进的 Cartographer 定位算法结合 PID 控制算法实现在已经生成的固定路径上的轨迹跟踪。控制舵轮的转角和速度, 最终控制 AGV 车跟踪到生成的路径上。采用 PID 跟踪轨迹的主要原理是逐渐减小横向误差<sup>[26]</sup>。即先为移动机器人规划出一条可移动路径, 然后移动机器人会计算出当前车体中心距离路径上最近点的距离, 将这个横向距离传到 PID 控制器中进行计算, PID 控制器会输出一个调整驱动轮的动作指令, 从而控制机器人逐渐向规划的路径移动, 逐渐减小横向误差, 最终可以沿着路径移动。PID 实现轨迹跟踪的运动学模型如下。

$$\dot{x} = V * \cos(\psi) \tag{18}$$

$$\dot{y} = V * \sin(\psi) \tag{19}$$

$$\dot{\psi} = \frac{V}{L} * \tan(\delta f) \tag{20}$$

$$\dot{V} = a \tag{21}$$

其中:  $\psi$  是 AGV 车的航向角,  $\delta f$  是通过 PID 控制器控制驱动轮转的角度。如图 13 所示是 AGV 叉车根据 PID 算法循迹示意图。

如图 13 所示, 假如 AGV 车起始点坐标为  $(x_0, y_0)$ , 起始点车体中心距离参考路径的横向距离为  $e_y$ , 将这个横向距离  $e_y$  传到 PID 控制器中, 经过计算得到一个驱动轮的转向角  $\delta f$ , 控制车以  $\delta f$  的角度向前移动一段距离, 再计算出一个横向距离  $e_y$ , 再根据 PID 控制器得到一个  $\delta f$  的转向角, 依次类推经过多次重复操作逐渐减小横向距离, 直到这个横向距离  $e_y$  减小到零, 最终 AGV 车会沿着路径移动到目标点。在循迹过程中 AGV 的状态更新参照如下公式:

$$x = x_0 + V * \cos(\psi) * dt \tag{22}$$

$$y = y_0 + V * \sin(\psi) * dt \tag{23}$$

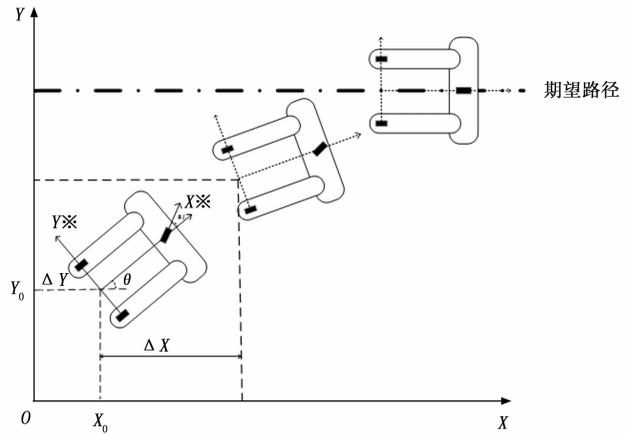


图 13 AGV 循迹图

$$\psi = \psi_0 + \frac{V}{L} * \tan(\delta f) * dt \tag{24}$$

$$V = V_0 + a * dt \tag{25}$$

其中:  $x_0, y_0, \psi_0, V_0$  是 AGV 的起始状态,  $\delta f$  是通过 PID 控制器控制驱动轮转的角度,  $dt$  是采样时间,  $a$  是 AGV 的加速度,  $x, y, \psi, V$  是 AGV 在  $dt$  时间段内更新后的状态。

## 3 实验结果与仿真

### 3.1 实验仿真及结果分析

基于上述的理论分析路径跟踪算法先进行仿真然后移植到 AGV 实物上进行测试, 判断其算法的效果。实验用 AGV 轴距  $L=0.8\text{ m}$ , 最大前视距离  $l_{\text{dmax}}=1.8\text{ m}$ , 最小前视距离  $l_{\text{dmin}}=1.0\text{ m}$ , 其前进时最大运行速度  $v_{\text{dmax}}=1.5\text{ m/s}$ , 最小速度  $v_{\text{dmin}}=0.4\text{ m/s}$ , AGV 实时速度根据目标线速度进行控制。AGV 跟踪路径仿真如图 14, 图中灰色曲线是生成的仿真路径, 黑色曲线是在仿真环境下 AGV 路径跟踪效果, 可以看到仿真效果很好。AGV 实测路径跟踪如图 15, 可以看出 PID 跟踪路径的效果比较理想, 跟踪过程中

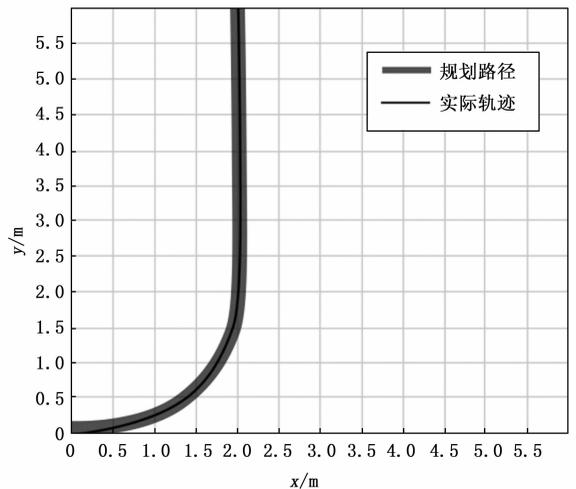


图 14 路径跟踪仿真图

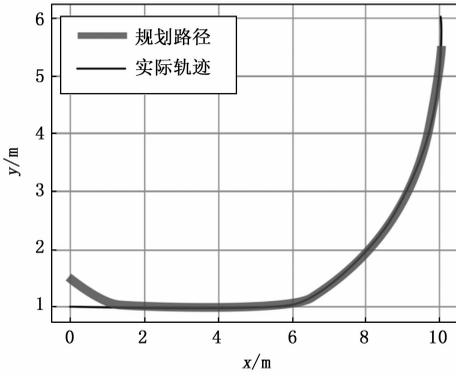


图 15 AGV 路径跟踪实测图

的位置偏差可以快速收敛，控制器有较好的跟踪性能，并且在多次测试中发现跟踪路径的执行时间小于 5 ms，具有良好的实时性。

如图 16 所示，通过采集 AGV 运动过程中的实时舵轮的转角，可以看到 AGV 对生成的路径跟踪过程中舵角变化连续平稳，保证了 AGV 运行过程的平稳性。

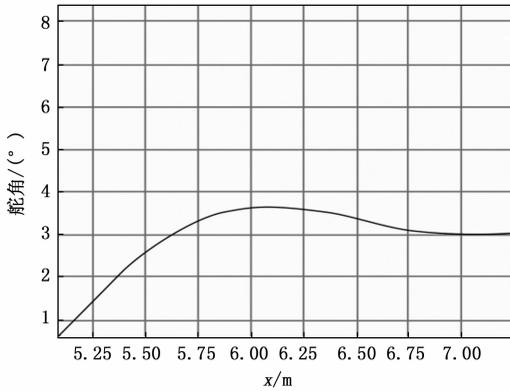


图 16 AGV 舵轮转角变化

### 3.2 AGV 循迹实测图

接下来是将仿真程序移植到实体 AGV 车上的测试图及数据。如图 17 所示，事先在 AGV 目标点处画出叉子的轮廓，然后让 AGV 车多次从不同的起始点走到目标点，对比到达目标点时车的位姿和事先画好的轮廓相差多少。结果验证，车的位姿和所画的轮廓基本重合，误差极小。



图 17 AGV 循迹实测图

由此可以在 AGV 叉车上对算法进行了可靠性验证，大大提高了定位精度，对 AGV 叉车进行反复测试得到如表 4 所示测量结果。

由表 4 数据可以看出，本文最终将定位误差精确到  $\pm 2$  cm 内，大大提高了定位精度，验证了算法的可靠性。并且此误差完全可以满足 AGV 在印刷车间正常工作。

表 4 改良后的定位数据 cm

测试编号	左右偏差	测试编号	左右偏差
1	2	1	1.5
2	2	2	2
3	1.5	3	1
4	0	4	2
5	0	5	-1
6	0.5	6	-0.5
7	0	7	-1
8	1	8	-0.5
9	0.5	9	1
10	1	10	2

### 4 结束语

本文针对印刷工厂车间背景下单舵轮 AGV 的应用，对导航精度和路径规划进行了研究，提高了 AGV 车在导航过程中整体的定位精度。在导航方面将 Cartographer 定位算法与 PID 控制算法结合进行导航，替代了传统 SLAM 导航框架中的 Move\_Base 节点的导航方式。在路径规划方面，设计自己的路径点生成算法，加入了直线轨迹和圆弧轨迹的局部路径，AGV 导航的整条路径均是由直线轨迹和圆弧轨迹所组成的，这种表示方法更加适用于印刷车间的作业环境，提高了 AGV 车利用 PID 控制算法循迹的效率，使得 AGV 车在移动过程中沿着规划出的固定路径更高效且准确的完成任务。本文改进的导航方法和路径规划算法可以适用于任何像印刷工厂车间这种环境下的作业。

#### 参考文献:

- [1] WU F, WU T, ZHANG Q. Research on key technologies of AGV in intelligent manufacturing [C] // In 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2020; 1852 - 1857.
- [2] 金 鑫. AGV 小车的发展现状与应用趋势 [J]. 北京工业职业技术学院学报, 2021, 20 (1): 10 - 13
- [3] 田 野, 陈宏巍, 王法胜, 等. 室内移动机器人的 SLAM 算法综述 [J]. 计算机科学, 2021, 48 (9): 223 - 234.
- [4] 刘媛媛, 公建宁, 张 萌, 等. 基于单舵轮 AGV 的 Gmapping SLAM 导航算法研究 [J]. 制造业自动化, 2020, 42 (2): 128 - 130.
- [5] YANG C, LIU S K, XU Z G. A simulation-based optimization method for facility layout considering the AGV path [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2430 (1), 1574 - 1595.

(下转第 321 页)