

履带式取样机器人底盘控制与导航算法设计

刘沛霖¹ 陈铁锋² 张战强² 毛学云² 刘金廷² 李泽亚¹ 闫熠杰² 孙晓东² 聂伟² 翟文正¹

1.华中科技大学, 湖北 武汉 430074

2.国能宁夏石嘴山发电有限责任公司, 宁夏 石嘴山 753099

[摘要]针对火电厂煤堆取样环境恶劣、人工采样效率低且存在安全隐患的问题, 设计并实现了一款基于 ROS 的履带式智能取样机器人底盘控制系统。系统采用分层模块化架构, 分为驱动层、控制层、感知层和决策层。控制层负责建立履带差速运动学模型, 实现速度到执行量的精确映射; 感知层利用 Gmapping SLAM 构建 0.05m 分辨率栅格地图; 决策层融合 A*算法与动态窗口法 (DWA) 实现分层路径规划, 并设计基于 RTK-GPS 的航点导航功能。在 20m×20m 仿真煤场中完成运动控制、建图、路径规划与 GPS 导航验证。结果表明, 系统能实时构建地图, 实现无碰撞平稳移动与航点准确到达, 定位误差小于 0.17m, 为煤场取样智能化提供了可行方案。

[关键词]取样机器人; ROS; SLAM 建图; 路径规划

DOI: 10.33142/nsr.v3i2.20001

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

Design of Chassis Control and Navigation Algorithm for Tracked Sampling Robot

LIU Peilin¹, CHEN Tiefeng², ZHANG Zhanqiang², MAO Xueyun², LIU Jintong², LI Zeya¹, YAN Yijie², SUN Xiaodong², NIE Wei², ZHAI Wenzheng¹

1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China

2. Guoneng Ningxia Shizuishan Power Generation Co., Ltd., Shizuishan, Ningxia, 753099, China

Abstract: In response to the problems of harsh sampling environment, low efficiency of manual sampling, and safety hazards in coal piles of thermal power plants, a ROS based tracked intelligent sampling robot chassis control system was designed and implemented. The system adopts a hierarchical modular architecture, which is divided into a driver layer, a control layer, a perception layer, and a decision layer. The control layer is responsible for establishing a differential kinematic model of the track and achieving accurate mapping from speed to execution; The perception layer utilizes Gmapping SLAM to construct a 0.05 meter resolution raster map; The decision layer integrates the A* algorithm and dynamic window method (DWA) to achieve hierarchical path planning, and designs a waypoint navigation function based on RTK-GPS. Complete motion control, mapping, path planning, and GPS navigation verification in a 20m × 20m simulated coal yard. The results show that the system can construct maps in real time, achieve collision free smooth movement and accurate arrival at waypoints, with a positioning error of less than 0.17 meters, providing a feasible solution for the intelligent sampling of coal yards.

Keywords: sampling robot; ROS; SLAM mapping; path planning

引言

火电厂作为煤炭消耗的主要场所, 其入炉煤质量检测的准确性直接影响锅炉燃烧效率和电厂运行成本。传统煤堆取样主要依靠人工完成, 存在劳动强度大、作业效率低、样品代表性差等突出问题。随着热电行业的转型升级, 开发高效可靠的自动化煤炭取样技术成为行业迫切需求^[1-3]。

智能取样机器人具有机动性强、操作灵活等优势, 能够实现全流程自动化取样作业。机器人操作系统 (ROS)

作为开源机器人软件开发平台, 提供了硬件抽象、底层设备控制、进程间消息传递等功能, 其分布式通信框架和模块化设计理念为复杂机器人系统的开发提供了有力支撑^[4-5]。

本文聚焦于履带式取样机器人的底盘控制与导航算法设计, 基于 ROS 搭建分层软件架构, 重点研究履带差速运动学建模、Gmapping SLAM 建图、A*与 DWA 融合路径规划及 GPS 航点导航等核心技术的实现方法, 并通

过 Gazebo 和 Rviz 仿真平台进行功能验证。

1 系统总体架构

1.1 软件分层设计

本系统基于 ROS 框架采用分层模块化架构，将软件系统自下而上划分为四个层次。

驱动层：负责与硬件设备直接交互，实现电机、IMU、GPS 等传感器的数据读取与控制指令下发。电机驱动节点建立履带差速运动学模型，将上层速度指令转换为左右电机的目标转速；IMU 驱动节点通过串口读取惯性数据并进行校准补偿；GPS 驱动节点解析 NMEA 协议，支持 RTK 高精度定位。

控制层：系统的核心执行模块，负责接收决策层指令并完成运动控制闭环。速度转换节点将/cmd_vel 话题中的 Twist 消息解算为左右轮角速度；里程计发布节点基于轮速反馈计算机器人的实时位姿；TF 广播节点建立 map→odom→base_link 的完整坐标变换树。

感知层：专注于环境感知与地图构建。基于 Gmapping 算法融合激光雷达扫描数据与里程计信息，实时构建栅格地图，为路径规划提供环境先验知识。

决策层：实现智能决策功能，包括基于 A*算法的全局路径规划、基于 DWA 的局部动态避障以及基于比例控制的 GPS 航点导航。

各层之间通过标准化的 ROS 通信机制交互，驱动层与控制层之间采用话题传递速度指令和传感器数据，决策层通过服务调用触发路径重规划等操作。

1.2 履带差速运动学模型

本文研究对象为差速驱动履带机器人，假设机器人在二维平面内运动，车体可视为刚性结构，运动由质心平移与绕竖直轴（z 轴）旋转两部分叠加完成。令机器人质心为 $C(x, y)$ ，以机器人前进方向为 x 轴、竖直向上为 z 轴，则横向方向为 y 轴。定义机器人质心线速度与角速度分别为 $v \in \mathbb{R}$ ， $\omega \in \mathbb{R}$ ，其中 v 表示质心沿 x 方向的线速度， ω 表示偏航角速度。左右履带等效线速度记为 v_{left} ， v_{right} ，左右电机角速度记为 ω_{lmotor} ， ω_{rmotor} ，履带等效半径记为 R ，履带中心距（左右履带中心间距）记为 W 。

为建立差速驱动运动学模型，采用如下理想化假设：履带与地面之间满足纯滚动约束，忽略切向滑移；系统在同一水平平面内运动；履带与电机之间传动比确定为 1。

在差速几何关系下，质心到左右履带中心的横向距离为 $W/2$ 。因此当机器人运动时，左右履带线速度可由平移与旋转分量叠加得到：

$$v_{\text{left}} = v - \omega \cdot \left(\frac{W}{2}\right) \quad (1)$$

$$v_{\text{right}} = v + \omega \cdot \left(\frac{W}{2}\right) \quad (2)$$

在纯滚动假设下，履带线速度与电机角速度满足：

$$v_{\text{left}} = \omega_{\text{lmotor}} \cdot \frac{2\pi}{60} R \quad (3)$$

$$v_{\text{right}} = \omega_{\text{rmotor}} \cdot \frac{2\pi}{60} R \quad (4)$$

其中 ω_{lmotor} ， ω_{rmotor} 以 rpm 表示时的换算因子已在公式中给出。

由 v_{left} ， v_{right} 反求质心速度，可得到正向运动学（从编码器反馈到机器人状态）：

$$v = (v_{\text{left}} + v_{\text{right}})/2 \quad (5)$$

$$\omega = (v_{\text{right}} - v_{\text{left}})/W \quad (6)$$

逆向运动学用于将上层速度指令 (v, ω) 映射为左右履带速度，从而生成电机可执行目标。由差速几何约束：

$$v_{\text{left}} = v - \omega \cdot \left(\frac{W}{2}\right) \quad (7)$$

$$v_{\text{right}} = v + \omega \cdot \left(\frac{W}{2}\right) \quad (8)$$

再由纯滚动关系反算电机目标角速度：

$$\omega_{\text{lmotor}} = \frac{v_{\text{left}}}{R} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (9)$$

$$\omega_{\text{rmotor}} = \frac{v_{\text{right}}}{R} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (10)$$

由于履带车辆存在不可忽略的牵引滑移与转向滑移，纯滚动假设在实际工况下通常并不成立。为了补偿这种滑移，常用的一种做法是根据转向方向对履带速度进行修正。检测到车辆转弯时，向外侧履带的目标转速乘以一个大于 1 的补偿系数。这种速度补偿方式能够在一定程度上抵消滑移带来的影响，使车辆的实际转向角度更接近期望值，从而提高轨迹跟踪精度。

2 关键算法实现

2.1 Gmapping SLAM 建图

基于粒子滤波的 Gmapping 算法是本系统实现同步定位与地图构建的核心方法。通过模拟激光雷达采集 360° 范围内的障碍物距离（360 个采样点，探测距离 12m），然后进行滤波与坐标转换，最后运行 Gmapping 算法。该算法将 SLAM 问题分解为路径估计与地图构建两个子问题，维护 80 个粒子分别代表可能的运动轨迹及其关联地图^[6]。每次迭代中，算法根据里程计运动模型进行预测，利用激光雷达观测计算粒子权重，并通过重采样淘汰低权

重粒子，使粒子集合收敛至真实轨迹。

地图采用 0.05m 分辨率的栅格表示。接收到激光扫描数据后，算法通过射线投射更新栅格状态：射线经过的栅格标记为空闲，终点标记为占用。随着机器人移动，已探索区域显示为白色（自由空间），障碍物为黑色，未探索区域为灰色。建图完成后保存，可以为路径规划提供环境先验知识。

2.2 A*全局路径规划

本系统采用分层规划架构，将路径规划问题分解为全局路径规划和局部路径规划两个层次^[7]。A*算法是一种结合 Dijkstra 算法与贪心搜索的启发式路径规划方法，其核心评价函数为：

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (11)$$

A*算法以实际代价 $g(n)$ 与欧氏估计 $h(n)$ 之和为评价函数，从起点扩展最小 $f(n)$ 节点至目标。系统将地图转为代价图（障碍物 100、自由 0、未知 50），并以 0.55m 半径膨胀障碍物。针对路径折角问题，采用三点平均迭代平滑，生成符合履带运动学的路径。

2.3 DWA 局部路径规划

DWA 算法在线速度和角速度空间内动态采样，模拟未来 1.5 秒轨迹，经加权评价函数选出最优指令^[8]。采样窗口受速度边界、加速度约束及安全制动约束限制。基于履带运动学模型，以 0.1s 步长迭代 20 步生成候选轨迹，并按三项指标评分：目标方向（权重 0.6）引导沿全局路径移动，避障（权重 0.8）惩罚近障轨迹，速度（权重 0.5）鼓励高效行驶。

本设计在传统评价函数基础上增加角速度得分项并引入转向死区机制：机器人朝向与目标方向角度差大于 10° 时，奖惩正确转向，惩罚错误选项^[9]；小于 10° 时进入死区，避免频繁摆动。当连续多个周期无法找到可行轨迹时，系统会触发全局重规划，从当前位置重新搜索路径。

2.4 GPS 航点导航

本设计在仿真环境中，模拟发布了 GPS 导航数据，让 GPS 航点导航节点能够获得导航所需要的全部信息。GPS 航点导航节点订阅 GPS 和里程计数据确定机器人位置，计算与目标航点的距离和方位角，通过比例控制算法输出线速度和角速度指令（/cmd_vel）驱动机器人逐一前往预设航点。该节点提供了添加、保存、加载航点及启动/停止导航等 ROS 服务接口，并针对航向角跳变和转向抖动做了平滑处理，以确保导航稳定性。

3 仿真结果验证

3.1 机器人模型构建

本设计定义了一款适用于室外煤场环境的差速驱动

机器人底盘，包含主体连杆、8 个车轮、两侧履带视觉装饰以及激光雷达，如图 1 所示。激光雷达安装于底盘顶部中央，具备 360° 扫描范围和 12m 探测距离。

传动系统采用差速驱动方案，以 1:1 传动比直接接收角速度指令。

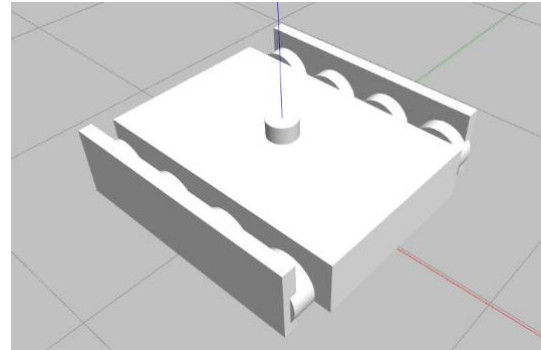


图 1 底盘模型

3.2 运动控制验证

为了测试小车的运动效果，创建了一个键盘控制节点。此节点订阅键盘的按键事件，将 W、A、S、D 这几个按键映射成线速度和角速度指令，通过/cmd_vel 发布话题。测试结果表明，线速度 0.5m/s、角速度 0rad/s 时左右轮速均为 4.2rad/s，实现直线行驶，如图 2 所示。线速度 0、角速度 0.8rad/s 时左右轮速分别为 2.7rad/s 和 -2.7rad/s，实现原地旋转，如图 3 所示。

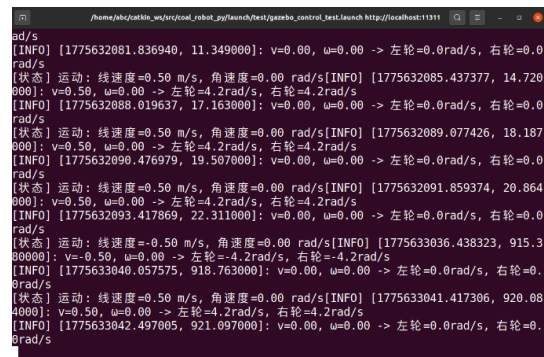


图 2 前进后退功能测试日志



图 3 旋转功能测试日志

项关键性能指标，如图 5 所示。机器人激光雷达的位姿（Laser Pose）从（3.11,1.64,-2.60）逐渐变化到（2.58,1.31,-2.60），每帧的“Registering Scans:Done”表示激光扫描数据成功配准，“Average Scan Matching Score”（平均扫描匹配得分）从 220.48 逐渐下降到 214.35，属于正常的波动范围，说明扫描匹配质量良好。整体来看，建图过程运行正常，机器人正在进行匀速直线运动以构建环境地图。

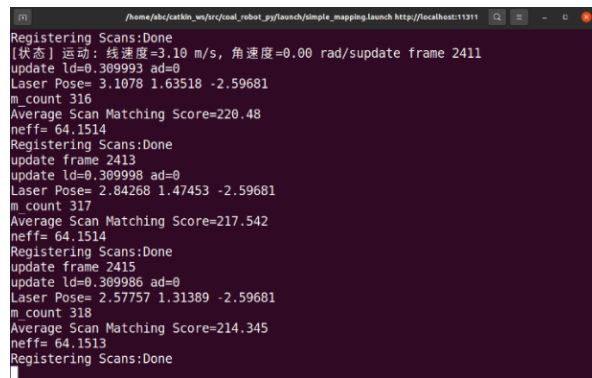


图 4 里程计位姿数据日志

SLAM 建图能够较好地还原场景的整体结构,并对主要几何目标进行有效的检测与重建。不过,与仿真环境相比,扫描结果在形状和位置上仍然存在一定的偏差,主要表现为障碍物的边界不够精确、目标之间的相对距离存在轻微的偏移。这说明 **SLAM** 在特征提取与匹配方面的精度,仍然会受到噪声、视角变化以及传感器观测不完整等因素的影响。总体来看,系统已经具备了建图与环境感知的能力,但在定位精度和细节一致性方面还有进一步提升的空间。

图 6 原始地图与 SLAM 扫描结果对比图

3.4 路径规划验证

在 Rviz 界面中显示了机器人在仿真环境中的自主导航过程，如图 7 所示图中灰色方块代表机器人本体，试图从当前的轨迹起点前往远处的红色目标点。绿色曲线即为全局规划算法计算出的全局最优路径，红色线条代表动态窗口算法生成的候选轨迹。

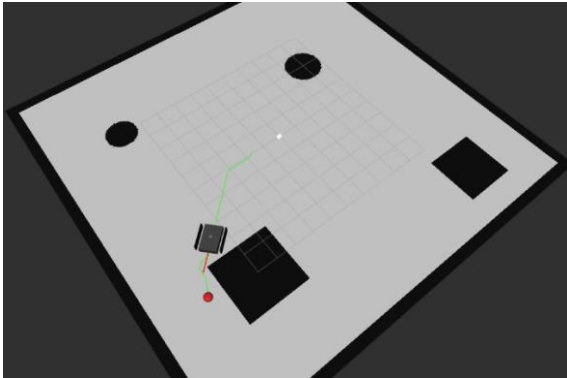


图 7 自主导航状态下的 Rviz 界面

在 Rviz 中设置目标点 (7.15,4.50)，A*算法成功规划出绕过障碍物的全局最优路径，DWA 算法实时生成候选轨迹并进行最优选择。

图 8 展示了一次示例路径规划过程的导航数据。可以看出，目标点设在 (7.15, 4.50)。通过连续多次输出的目标方向与机器人朝向之间的角度差 (-9.3°) 可以看出，局部规划器一直在持续调整机器人的姿态，让它逐渐对准目标点。最后系统输出了“到达目标点”的确认信息，机器人停止，最终位置是 (7.12, 4.33)，朝向调整到了 90.8°，这时离目标点的位置误差大约是 0.17m。结果说明，路径规划算法能引导机器人准确到达指定的目标点，路径规划功能能正常运行，路径规划算法能够引导机器人准确到达目标点。

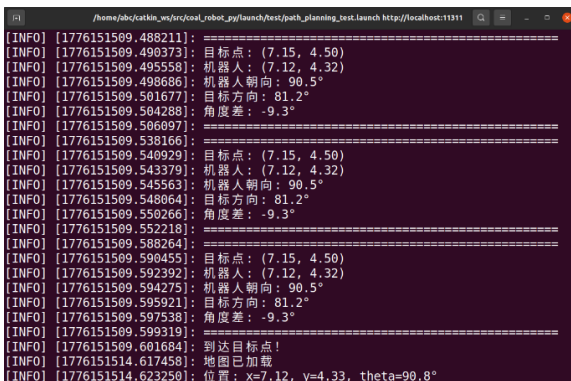


图 8 路径规划导航与到达日志

3.5 GPS 航点导航验证

用键盘将机器人移动到第一个目标位置，将当前位置

添加为航点。待所有航点添加完毕，开始导航。可以看到，机器人会自动向第一个航点移动，待所有航点都到达之后，机器人会自动停止运动。

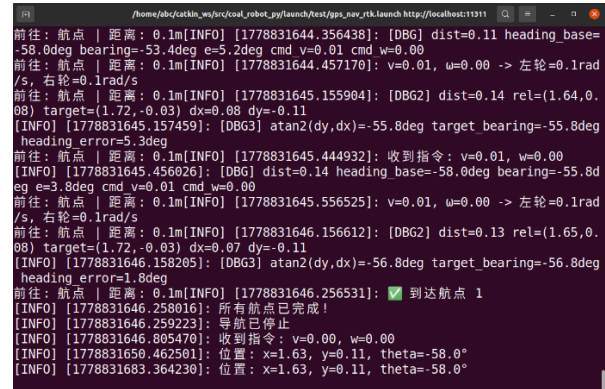


图 9 GPS 运行日志

图 9 展示了一次示例导航功能输出。在执行航点导航的过程当中，程序会持续计算机器人相对于目标航点的位置误差与航向误差。在当前航点阶段，距离 dist 多次下降，并在约 0.1m 附近波动，同时，由 dx/dy 计算得到的目标方位角 target_bearing 与当前航向 heading_base 之间的航向误差 heading_error 保持在较小范围之内，这说明车辆在接近目标点时方向的调整比较稳定。到达目标点输出的最终位置表明，在 waypoint_tolerance=0.1m 的容差条件下，机器人确实可靠地到达了航点。

4 结语

本文针对火电厂煤堆取样需求，基于 ROS 实现了履带式取样机器人底盘控制系统。采用分层架构，融合差速运动学、Gmapping 建图、A*与 DWA 路径规划及 GPS 导航。仿真结果表明，机器人能实时构建地图、实现无碰撞自主移动与航点遍历，为煤炭取样智能化提供了可行方案。

[参考文献]

- [1]毕宗仁,黄波,田浩亮,等.2025 年(第八届)火电燃料管理及智能技术应用研讨会论文集[C].[出版地不详]:阳城国际发电有限责任公司,2025.
- [2]任虎,王祁峰.煤炭采制样过程中的误差来源与分析[J].内蒙古煤炭经济,2025(19):24-26.
- [3]陈慧珠.煤炭检测中多种数据控制方法的协同应用研究[J].煤炭新视界,2025(1):49-50.
- [4]张扬,马晓燕,杨艳胜,等.煤炭检验准确性影响因素及提升措施[J].质量与认证,2025(2):92-94.
- [5]陈彩菊.影响煤炭质量检测效果的因素与应对措施[J].

煤炭加工与综合利用,2025(4):113-115.

[6]刘志成,王华龙,马兴录.激光即时定位与建图算法综述[J].计算机测量与控制,2024,32(3):1-8.

[7]孟凡一.基于分层架构的多机器人动态调度方法研究[D].大连:大连理工大学,2024.

[8]闫林伟,范小宁.基于自适应动态窗口算法的 AGV 局部

路径规划[J].南京信息工程大学学报,2025,17(5):740-748.

[9]张延军,韩雨.基于改进 DWA 的四轮差速移动底盘模型算法研究[J].组合机床与自动化加工技术,2024(9):98-103.

作者简介:刘沛霖(2004—),男,汉,湖北省武汉市蔡甸区人,在读研究生,就读于华中科技大学机械工程专业,研究方向为履带机器人底盘控制与导航。