

# 隧道安全预警机器人自主导航方法研究

刘 未, 朱宏辉

(武汉理工大学 物流工程学院, 武汉 430063)

**摘要:** 针对隧道施工环境, 设计了一款隧道安全预警机器人, 并重点研究其导航系统实现; 机器人搭载检测仪器与分析主机, 集数据采集、分析、预警于一体, 实现隧道巡检的自动化和智能化; 分别利用 Cartographer 算法和自适应蒙特卡洛算法 (AMCL) 融合雷达、里程计、IMU 的数据, 实现环境地图的创建与机器人实时定位; 采用 A\* 算法和 DWA 算法实现机器人的全局和局部路径规划, 并结合 ROS 操作系统对其进行实验验证; 实验结果表明: 在导航定位时, 机器人位置误差和航向误差分别小于 20 cm 和 5.5°, 能满足实际工程需要, 完成自动巡检任务。

**关键词:** 多传感器融合; 自动导航; 自动巡检

## Research on Autonomous Navigation Method of Tunnel Safety Early Warning Robot

LIU Wei, ZHU Honghui

(School of Logistic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Aiming at the tunnel construction environment, a tunnel safety warning robot is designed, and focusing on the realization of its navigation system. The robot is equipped with some detection instruments and an analysis PC to achieve data collection, analysis, and early warning automatically and intelligently in tunnel inspection. The robot uses the Cartographer algorithm and the adaptive Monte Carlo algorithm (AMCL) to fuse the data of radar, odometer, and IMU and to realize the creation of environmental maps and real-time positioning of the robot. The A\* algorithm and the DWA algorithm are used to realize the robot's global and local path planning, and the ROS operating system is used for experimental verification. The experimental results show that the position error and heading error of the robot are less than 20 cm and 5.5° respectively during navigation and positioning, which can meet actual engineering needs and complete automatic inspection tasks.

**Keywords:** multi-sensors fusion; autonomous navigation; auto cruise

## 0 引言

随着我国交通事业的发展, 各类隧道工程陆续开展, 隧道施工的安全性问题被越来越重视。隧道施工期间的监控量测一般采用的人工检测, 存在工作量大、监测频率低、过程繁琐等不足。因此实现监测采集过程的自动化智能化, 将有效减少人工成本, 降低安全风险, 保障隧道施工的安全。

高精度的导航定位、安全可靠的避障是实现隧道安全预警机器人自动巡检的重要前提。目前, 国内外常用的导航方案各有优劣: 磁导航主要应用在场景固定的仓库等环境, 需布置磁钉或磁条, 导航实现简单, 但无法实时避障; 距离传感器导航通过发射和接收红外线、超声波、激光等实现距离检测, 精度较高, 但对于某些环境存在局限性; 卫星导航可以全球性导航, 但其定位精度在米级, 无法应用在精度要求高的场景; 视觉导航主要通过相机获取环境

信息, 图像包含的信息十分丰富, 但对图像进行处理时, 存在数据量大、分析计算复杂等问题<sup>[1-2]</sup>。

综上所述, 使用单一技术的导航方案均不能满足实际应用要求。本文集超声波局部探测、视觉非结构化探测和激光雷达地图创建为一体, 解决单一信息导航技术存在的问题, 安全可靠地建立环境地图, 规划最优路径, 从而实现隧道安全预警机器人的巡检导航定位。

## 1 系统组成及原理

隧道安全预警系统由隧道安全预警机器人与远程监控平台两部分组成<sup>[3]</sup>, 如图 1 所示。其中, 机器人是预警系统的核心, 通过其搭载的检测仪器完成数据采集、结果分析和危险报警等任务; 远程监控平台用于获取和显示机器人最终检测结果, 便于管理者了解现场状况, 及时决策。机器人与监控平台之间通过网络进行通信, 分工协作地完成检测与预警任务。

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2021-01-20。

基金项目: 国家自然科学基金委员会青年科学基金(51805395)。

作者简介: 刘 未(1996-), 男, 湖北麻城人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式控制、机器人导航与避障方向的研究。

朱宏辉(1956-), 男, 湖北麻城人, 博士, 教授, 主要从事智能控制、嵌入式技术研究及机电一体化方向的研究。

引用格式: 刘 未, 朱宏辉. 隧道安全预警机器人自主导航方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 172-177.

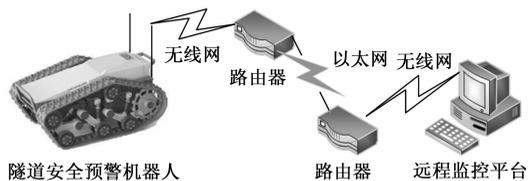


图 1 隧道安全预警系统架构

### 1.1 设计思路

隧道安全预警机器人实现的功能有: 变形监测、掌子面水源检测、自动导航、自动对桩、智能分析预警等。

隧道施工过程中主要需要进行变形监测和水源检测, 机器人检测的工作过程如下: 1) 变形监测: 机器人从起始位置出发, 自动导航至指定检测点, 利用搭载的三维激光扫描仪进行扫描, 经数据分析后实现隧道壁的变形检测与预警, 随后回到起始位置进行充电; 2) 水源检测: 机器人从起始位置出发, 自动导航一段距离后, 人工通过遥控控制机器人通过栈桥, 到达掌子面后, 遥控控制机器人进行水源检测, 获取前方地质水源信息, 将分析结果传输至预警平台进行及时预警。

针对隧道复杂的施工环境, 为实现以上的检测与预警功能, 机器人采用了履带式的底盘, 并将部分检测仪器与控制主机放置在密封性强的内仓中, 提高机器人的安全性与稳定性; 考虑到若利用传统的全站仪测量施工时隧道壁的变形, 将难以集成至机器人上实现检测的自动化与智能化, 选择搭载三维激光扫描仪来实现变形检测的功能, 通过激光扫描后获取隧道点云数据, 两次点云数据对比后即可获取相对变形量; 对于掌子面水源地质检测, 将采用瞬变电磁法获取前方地质信息, 这种方法需要利用到发射和接收线圈, 并有多种检测位置, 因此设计了一种探水天线自动调节装置, 实现对其工作位置的控制。

机器人自动导航的实现则依赖于丰富的传感器数据及行之有效的处理算法。因此机器人搭载了多种传感器用于获取环境信息, 基于机器人操作系统 (ROS, robot operating system) 实现地图构建, 路径规划与导航避障。

### 1.2 硬件设计

隧道安全预警机器人硬件部分由环境感知模块、检测模块、控制与数据处理模块、运动控制模块和无线模块 5 部分组成, 如图 2 所示。

#### 1.2.1 环境感知模块

要实现精准可靠的导航, 机器人必须获取足够的环境数据, 以此来推算自身状态。机器人搭载了二维激光雷达, 可实现隧道环境信息的高效获取; 采用履带式差速驱动, 配备增量式编码器, 能实时反馈机器人的里程位姿信息; 搭载红外相机, 通过实时图像处理对前进路线上的障碍物进行可靠的检测; 超声波传感器和激光雷达类似, 用来实现近距离避障; 超宽带传感器 (UWB, ultra wide band) 可以提供全局地定位信息, 用来纠正里程计和 IMU 的累计偏差。

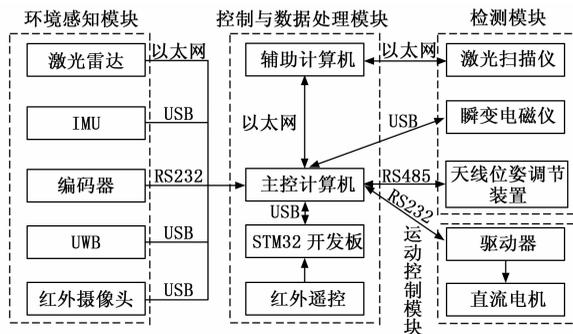


图 2 隧道安全预警机器人硬件结构图

#### 1.2.2 检测模块

机器人上搭载了瞬变电磁仪、三维激光扫描仪等检测设备。瞬变电磁仪能对掌子面前方水文地质情况进行检测, 三维激光扫描仪能对隧道已挖掘部分进行扫描建模、变形分析。搭载的瞬变电磁仪在检测时, 其探测天线共有 35 种不同位姿, 因此设计了一种天线位姿自动调节装置, 主体采用铝合金、玻璃钢、碳纤维等型材, 通过电动推杆、直流电机、数字舵机实现运动和位置控制。预警机器人在巡检过程中, 控制以上仪器进行数据采集、分析处理, 并根据报警阈值实现实时预警。

#### 1.2.3 控制与数据处理模块

机器人需要处理的数据主要包括控制指令和检测仪器的测量数据, 机器人搭载两台工控机和一个 STM32F1 主板作为控制和分析主机, 一台工控机安装 ubuntu 操作系统, 作为机器人的控制核心, 另一台工控机安装 Windows 系统用于车载检测仪器的控制和实时数据分析; STM32 主板主要用于天线位姿控制及其他辅助控制; 红外遥控输出信号接至 STM32 主板, 用于进行模式选择与手动控制。

#### 1.2.4 运动控制模块

在隧道中特别是靠近掌子面的地方, 路面凹凸不平, 同时探水检测时需要上下坡, 所以选择履带式的机器人底盘作为运动平台。机器人通过驱动器控制两个直流无刷电机, 采用差动控制的方式实现前进和转向。电机处安装霍尔传感器, 运用 PID 算法实现精准转速控制, 保障行驶时的平稳和安全。

#### 1.2.5 无线模块

无线模块主要是通过构建局域网与互联网的方式, 实现机器人与远程监控平台的交互。机器人可通过无线模块将检测的原始数据及分析结果传输至监控平台, 也可接收远程指令对机器人进行操控。极大地简化了检测流程, 同时也便于及时发现险情, 及早采取防范措施。

### 1.3 软件设计

机器人的软件架构如图 3 所示, 控制系统以 Linux 操作系统为核心, 主要分为导航模块和功能模块。导航模块包括传感器数据的获取与处理, 建图与定位的实现, 路径规划与导航的实现; 功能模块中又涉及到通信、数据传输、

仪器控制, 检测数据分析等部分。导航模块主要基于 ROS 提供的 C++ 接口, 而功能模块采用 C++ 编程语言, 通过利用各种仪器与设备提供的硬件接口与软件协议实现既定的功能。最终将导航模块与功能模块整合形成最终的控制系统。导航模块的具体实现此处不再赘述, 接下来主要介绍功能模块的实现。

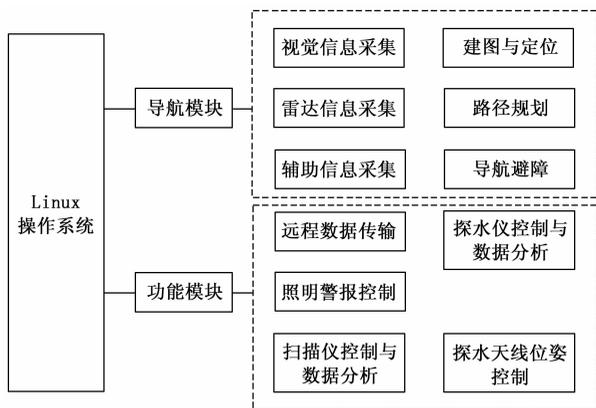


图 3 机器人软件架构图

功能模块主要实现通信与控制, 包括远程数据传输, 照明警报控制、扫描仪控制与数据分析、探水仪控制与数据分析、探水天线位姿控制。

远程数据传输是通过网络实现的, 机器人主机通过采用 http 协议将分析完成的检测结果发送至远程监控平台, 平台对数据进行读取并进行预警; 照明警报控制通过继电器实现, 主机通过 RS232 串口发送相应指令至 STM32 主板, STM32 接收到信息输出 PWM 信号至继电器, 通过继电器最终实现对照明灯与警报灯的控制; 探水仪位姿控制通过 STM32 实现, 采用 RS485 通信方式, STM32 发送指令至数字舵机, 即可实现转角控制; 探水仪控制与数据分析采用 USB 方式, 通过串口通信实现指令发送与检测数据的获取; 三维激光扫描仪的控制与数据分析采用无线网络实现, 由于分析软件平台受限 (只提供 Windows 接口), 因此数据分析完成之后, 通过有线网络, 采用 TCP/IP 协议将分析结果发送至主控计算机, 最终发送至远程监控平台。

以变形检测为例, 介绍整个系统工作流程如图 4 所示。

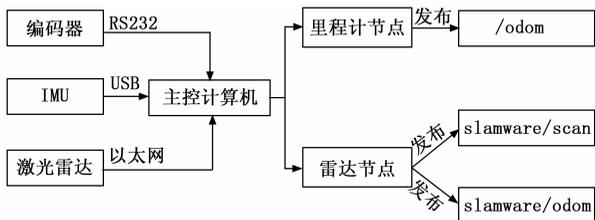


图 4 机器人变形检测流程

## 2 环境感知与地图建立

自动驾驶系统是实现机器人自动巡航的核心, 它主要由环境感知、地图建立、自主定位及路径规划等部分组成。

### 2.1 传感器数据获取

机器人搭载的传感器主要有激光雷达、编码器、IMU、超声波传感器、红外摄像机等。各种传感器的数据均通过相应硬件接口获取, 并通过 ROS (robot operating system) 发布至节点管理器, 通过 USB 串口可实时获取激光雷达数据、位姿数据。编码器的数据通过 RS232 串口获取, 超声波传感器及 IMU 的数据同样通过主机与相应传感器模块通信获取, 获取传感器数据后对该数据进行相应的处理, 创建 ROS 消息节点并发布至 ros master。获取过程如图 5 所示。

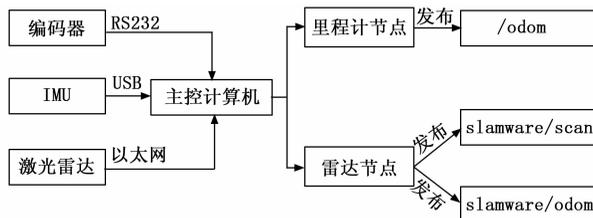


图 5 传感器数据获取与处理

### 2.2 环境地图建立

常用的建图算法一般可分为基于滤波和基于优化的算法, 本文选择图优化算法 Cartographer<sup>[4]</sup>, 在有较高的建图精度的同时, 也能保证较少的时间消耗。采用前后端的方式实现地图的构建, 能实现整个建图过程的位姿优化, 避免了累计的建图误差。建图及优化过程如图 6 所示。

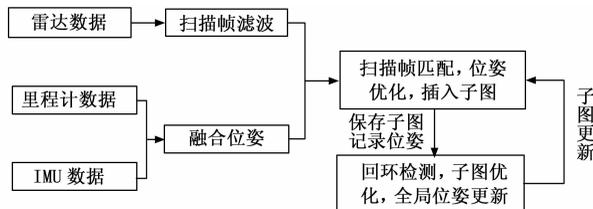


图 6 Cartographer 算法建图过程

Cartographer 算法前端采用占据栅格地图的形式, 首先使用 IMU 和里程计的信息得到机器人的初始位姿, 之后将当前激光雷达扫描帧与已知子地图进行匹配。再经过位姿优化后, 插入子地图 Submap 中, 最终由多个 Submap 构建完整地图。

后端算法主要是用来优化全局地图, 由于子地图构建时只考虑当前激光帧, 所以会有累积建图误差, 为消除累积误差, 需进行全局优化。激光扫描图被插入到子地图时的姿态被存储到内存中, 当一个子地图创建完成后, 所有对应的扫描图和子地图对都被考虑进来进行闭环检测, 实现全局优化。

### 2.3 自主定位

自主定位指的是机器人能够根据采集的传感器信息, 推算出自己在已知地图中的位置。这是机器人进行有效路径规划的基础, 定位不准将导致导航误差大, 甚至根本无法到达目标点。

ROS 为开发者提供了一种自适应的蒙特卡洛定位功能 (AMCL, adaptave monte carlo localization), 该算法以蒙特卡洛定位算法为基础, 采用粒子滤波的方法, 来跟踪已知地图中机器人的实时位姿<sup>[5-6]</sup>。对于可能存在的粒子退化问题, 增加了自适应的 KLD (kullback-leibler distance) 方法更新粒子, 实现更加准确的位姿估计。估计过程如图 7 所示。

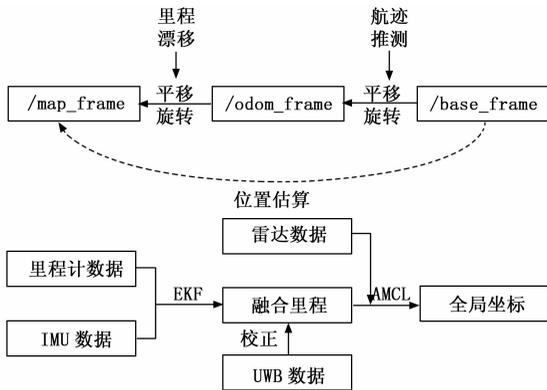


图 7 AMCL 位姿估计过程

由于里程计和 IMU 都属于相对定位传感器, 行驶距离过长或运动不平稳将会导致误差增大, 因此增加 UWB 作为绝对定位传感器定期纠偏, 采用扩展卡尔曼滤波的方法将里程计和 IMU 数据进行融合, 得到融合后的位姿, 最后采用 AMCL 算法融合里程信息和激光雷达数据, 得到机器人的全局坐标。

### 3 路径规划

全局路径规划是根据已知地图, 规划出一条最优的无碰路径, 使机器人能安全快速的到达目标位置; 局部路径规划则是为了让机器人能够沿着全局规划产生的路径运动, 同时也要躲避可能出现的动态障碍。因此, 只有合理地选择全局和局部的路径规划算法, 才能实现自动导航的目标。

#### 3.1 全局路径规划

全局路径规划的路径搜索方法主要有 Dijkstra 算法、可视图法、A\* 算法、D\* 算法等<sup>[7-8]</sup>。针对隧道环境, 采用 A\* 算法能较快地得到最优路径。A\* 算法是一种启发式的搜索, 它在搜索过程中会利用目前已知的状态信息来进行下一步选择。其基本思想如下:

对于每个节点  $n$ , 它引入了一个估价函数  $f(n)$ , 其定义如下:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中,  $g(n)$  代表从起点到当前节点  $n$  的代价, 可通过距离等来度量;  $h(n)$  代表从当前节点  $n$  到终点的代价估计,  $h(n)$  可根据实际情况选择, 但在选择时必须满足以下条件: 代价函数估计值不能高于当前节点到终点的实际最小代价。在搜索时, 每次寻找的目标集合为当前节点的所有邻接节点, 选择的下一个节点为邻接节点中估价函数  $f(n)$  最小且未被访问过的节点, 如此迭代直至到达终点。

A\* 算法的核心是设计估价函数, 估价函数有许多不同的选择, 主要使用欧几里德距离或曼哈顿距离作为估价函数。此处选择欧几里德距离作为估价函数进行全局路径规划。

#### 3.2 局部路径规划

在前文通过应用 A\* 算法对机器人的全局路径进行了可靠的规划, 但是只适用于已知的静态环境。在移动机器人的实际应用场合中, 通常会出现未知的动态物体, 为了保证机器人的安全和顺利完成巡检任务, 就需要进行局部路径规划。局部路径规划相比于全局路径规划, 更加侧重于机器人的实时性和避障能力。

常用的局部路径规划算法有人工势场法、模糊逻辑算法和动态窗口法 (DWA, dynamic window approach) 等。考虑在隧道环境下避障的安全性与时性, 以及在 ROS 系统下集成开发的难度, 选择使用动态窗口法来实现机器人的局部路径规划与避障。

##### 3.2.1 DWA 速度采样

DWA 算法的主要原理为根据移动机器人当前状态以及接收到的运动指令, 在移动机器人下一步可能的速度空间中采样多组具体速度值  $(v, \omega)$ , 分别模拟机器人下一时刻的运动轨迹, 然后对多组模拟轨迹进行评价对比, 选择满足最优轨迹的速度对  $(v, \omega)$ , 作为移动机器人的下一步速度输入<sup>[9-11]</sup>。采样模拟过程如图 8 所示。

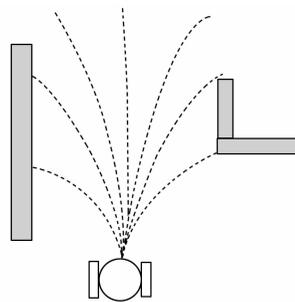


图 8 DWA 速度采样与轨迹模拟

由于机器人自身结构的限制和所处环境的约束, 速度空间  $V_s$  中的速度对  $(v, \omega)$  有以下速度约束:

- 1) 最大 (小) 速度限制:

$$V_m = \{v \in [v_{min}, v_{max}], \omega \in [\omega_{min}, \omega_{max}]\} \quad (2)$$

- 2) 最大加 (减) 速限制:

$$V_d = \{(v, \omega) \mid v \in [v_c - a_{vmin}\Delta t, v_c - a_{vmax}\Delta t], \omega \in [\omega_c - a_{\omega min}\Delta t, \omega_c - a_{\omega max}\Delta t]\} \quad (3)$$

- 3) 为保障机器人的安全, 机器人必须能在障碍物前停止, 因此有安全距离限制:

$$V_a = \{(v, \omega) \mid v \leq \sqrt{2 \cdot dis(v, \omega) \cdot a_{vmin}}, \omega \leq \sqrt{2 \cdot dis(v, \omega) \cdot a_{\omega min}}\} \quad (4)$$

根据速度对  $(v, \omega)$  模拟出运动轨迹, 然后判断机器人以此轨迹行进时, 是否满足以上 3 个限制条件, 若满足则加入至速度采样空间, 否则舍弃。最终得到的速度采样空

间为  $V_s = V_m \cap V_d \cap V_a$ 。

### 3.2.2 DWA 轨迹评价

完成速度采样之后，需要对可行速度对  $(v, \omega)$  进行评价分析，以此来选择最优的速度对作为下一阶段的速度指令。评价函数的公式为：

$$G(v, \omega) = \sigma(\alpha \cdot heading(v, \omega) + \beta \cdot dist(v, \omega) + \gamma \cdot velocity(v, \omega)) \quad (5)$$

式中， $heading(v, \omega)$  表示当机器人采取速度对  $(v, \omega)$  时，运行轨迹终点处的航向和目标点之间的夹角，夹角越小说明运动方向越趋于目标点，通常取其表达式为：

$$heading(v, \omega) = 1 - \frac{\theta}{\pi} \quad (6)$$

$dis(v, \omega)$  表示采取此速度对  $(v, \omega)$  时，机器人的运动轨迹与周围障碍物的最近距离值，距离值越大，表示机器人离障碍物越远，也就越安全； $velocity(v, \omega)$  用于评价此模拟速度相对运动轨迹的速度大小，通常设其表达式为：

$$velocity(v, \omega) = \frac{(v, \omega)}{(v_{max}, \omega_{max})} \quad (7)$$

各单项评价函数的系数  $\alpha$ 、 $\beta$  以及  $\gamma$  分别表示各自的权值，随后对三项评价函数进行归一化处理，DWA 算法具体实现流程如图 9 所示。

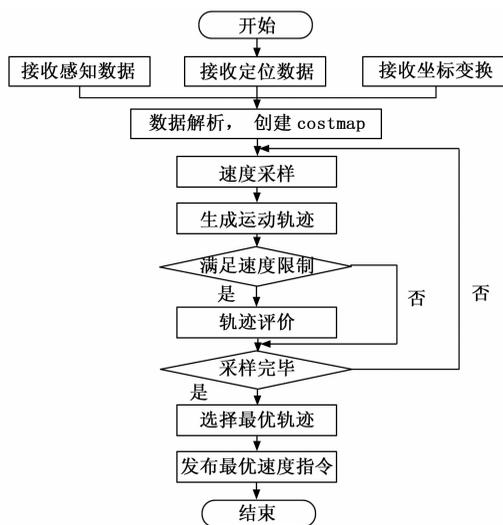


图 9 DWA 算法实现流程图

### 3.2.3 局部避障

通过采用 DWA 算法进行局部路径规划，能在一定程度上避开前方障碍物。但是，避障时主要使用激光雷达，它只能扫描到同平面的障碍物，有一定的局限性，因此增加了超声波传感器以及红外摄像机作为辅助避障传感器。超声波传感器扫描范围为锥形，能识别低矮障碍。而相机视角广信息更丰富，这在一定程度上提高了障碍物的识别率，使导航避障更加安全可靠。改进的避障过程如图 10 所示。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 实验环境及流程

选择室外环境进行实验，首先遥控机器人采集周围环

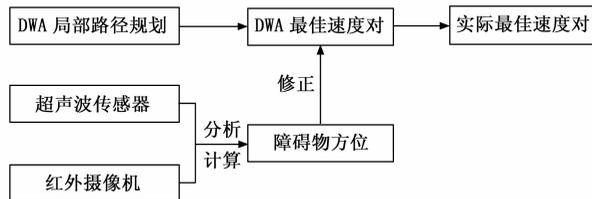


图 10 改进的避障策略

境数据，建立环境地图。返回起点，随后准备标记测量点，遥控机器人至指定测量点并记录当前点坐标（选择图 9 中直线交叉点作为目标测点，便于测量误差），随后前往下一测点，直至记录完所有测量点。标记时在中途和返程途中增加一些辅助坐标点，让机器人尽可能靠一侧行驶。返回起点后修改测量点类型。测量点的属性如表 1 所示，主要包括测点编号、类型、位置、方位及精度等字段，通过修改以上字段可选择停车位置，转向位置，检测任务类型等。导航目标点通过 json 文件的形式存储，在执行巡航任务时读取 nav.json 文件进行导航与检测。

表 1 导航目标点属性

字段名称	数据类型	说明
number	int	目标点编号
position	float[3]	目标点位置
orientation	float[4]	目标点方位
type	char	目标点工作类型
accuracy	float	目标点精度要求

### 4.2 实验步骤

实验过程主要检验机器人自动导航的精度以及可靠性，总共进行 10 次自动导航实验。实验步骤如下：

- 1) 启动建图程序，遥控机器人运动，获取实验环境信息，建立环境地图；
- 2) 返回起点，重启机器人，遥控至指定测量点（选取 3 个测量点），记录测量点坐标；
- 3) 返回起点，重启计算机，启动导航程序，修改导航点属性，随后机器人将读取选定的测量点坐标及属性，开始自动导航；
- 4) 等待机器人到达测量点，记录本次与首次标记时的位置偏差，直至完成本次导航任务；
- 5) 遥控机器人回到初始位置，重启计算机，重复步骤 3)、4)，直至完成 10 次实验。

实验时先将机器人置于初始位置，始终从同一起点出发进行实验并记录实验数据，同时在环境中增加部分静态障碍物或者人为阻挡机器人以检验其避障能力和导航稳定性。本次实验共进行了 10 次自主导航测试，分别记录测试时的偏差值。每次测试完成后，均让机器人回到初始位置并重启机器人，避免实验误差累计影响最终结果。

### 4.3 实验数据与分析

实验过程中共标记有 3 个工作测点，分别与初始指定

测点位置对比, 得到其 X, Y 方向位置偏差 (Y 方向为沿隧道方向)、整体位置偏差、航向角偏差。实验结果如图 11 和表 2 所示。

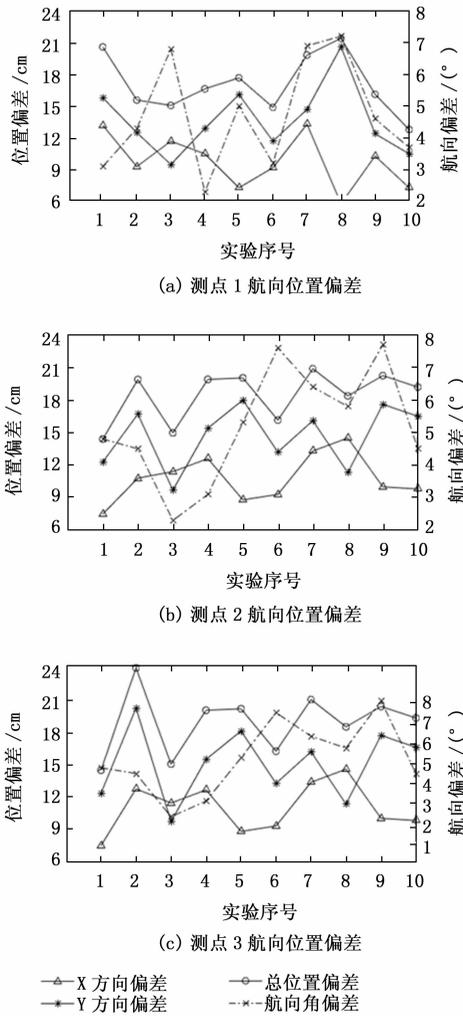


图 11 各测量点的导航航向位置偏差

表 2 测量点导航定位数据

测量点	评价指标	位置偏差/cm			航向偏差/(°)
		X	Y	综合	
测点 1	平均偏差	9.79	13.67	17.06	4.71
	标准差	2.52	3.24	2.77	1.74
测点 2	平均偏差	10.80	14.68	18.40	5.2
	标准差	2.17	2.86	2.36	1.76
测点 3	平均偏差	10.99	15.02	18.79	5.25
	标准差	2.25	3.29	2.89	1.84

10 次测试的实验数据对比如表 2 所示。由表可知, 隧道安全预警机器人 10 次测试的平均位置偏差和航向偏差分别小于 20 cm 和 5.5°, 标准差分别小于 3.5 cm 和 1.9°。同时, 在导航过程中出现动态障碍时基本上能避开障碍, 安全地到达指定目标点。综上, 隧道安全预警机器人具有一

定的导航定位精度与避障能力, 能满足隧道施工环境的巡检要求。

### 5 结束语

1) 针对隧道施工环境, 设计了一款隧道安全预警机器人。通过采用模块化的设计思想, 极大地提高了设计开发效率, 降低了维护维修难度。通过其上搭载的检测仪器与分析主机, 可以十分方便地进行检测, 实时地进行数据分析与处理, 及时发现险情。杜绝了繁琐的人工操作, 避免了数据处理不及时带来的不良后果。同时, 通过无线模块将检测数据与实时视频信息传输至远程监控平台, 极大地提高了预防风险和快速响应的能力。

2) 本文重点研究了在隧道环境下的机器人导航定位问题, 通过采用多种导航技术相结合的方法, 实现了机器人的自动巡航检测。机器人的自主导航定位基于 ROS 操作系统, 通过融合激光雷达、里程计、IMU 等传感器数据, 实现机器人的定位、路径规划、动态避障等功能。实验结果表明, 机器人导航定位的精度和稳定性能满足实际工程需求。

#### 参考文献:

[1] 孙 奇. AGV 系统路径规划技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[2] Al-MUTIB K N, MATTAR E A, ALSULAIMAN M M, et al. Stereo vision SLAM based indoor autonomous mobile robot navigation [C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, 2014: 1584-1589.

[3] 祖 琪, 王 丹, 高明华, 等. 基于激光雷达的巡检机器人导航系统研究 [J]. 电子测试, 2018 (22): 32-33.

[4] 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), 2016: 1271-1278.

[5] 胡春旭. ROS 机器人开发实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[6] THALE S P, PRABHU M M, THAKUR P V, et al. ROS based SLAM implementation for autonomous navigation using turtlebot [C] // ITM Web of Conferences, 2020: 5-9.

[7] HU T C, KAHNG A B, ROBINS G. Optimal robust path planning in general environments [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9 (6): 775-784.

[8] DENG X, MIRZAIAN A. Competitive robot mapping with homogeneous markers [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12 (4): 532-542.

[9] 王永雄, 田永永, 李 璇, 等. 穿越稠密障碍物的自适应动态窗口法 [J]. 控制与决策, 2019, 34 (5): 927-936.

[10] 陈超勇, 熊禾根, 陶 永, 等. 基于高效模板法与动态窗口法的服务机器人全覆盖路径规划方法 [J]. 高技术通讯, 2020, (9): 949-958.

[11] DANIEL T F B, ZULUETA E, UNAI F G, et al. Predictive dynamic window approach development with artificial neural fuzzy inference improvement [J]. Electronics, 2019, 8 (9): 935-953.