

吴海伦,王凯. 无人物流车自动行驶系统设计[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(4): 28-34. DOI: 10. 20169/j. issn. 2095-2163. 24061601

无人物流车自动行驶系统设计

吴海伦, 王 凯

(大连东软信息学院 计算机与软件学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为优化校园区域内物流末端配送方式, 本文完成了对自动行驶物流车的系统分析与设计。该车采用 STC89C52RC 单片机作为电机驱动中心, STC15F2K60S2 单片机为主控中心的双芯片硬件结构。通过 MPU6050 和 QMC5883L 组成的姿态传感器采集角速度、加速度和磁场数据, 根据数据解算方位角和偏航角。通过 GPS 模块的经纬度坐标、TPO 三点优化路径规划程序、自动行驶程序和姿态传感器角度数据实现导航功能。主控中心运行导航程序发送控制指令, 驱动中心接收指令后将其转化为电信号控制智能车运动。实验结果表明, 该智能车实现路径规划与自动行驶功能, 运动轨迹较目标路径偏差均值为 0.95 m, 最大值为 2.24 m, 能够有效完成校园区域内端点间物流运输任务。

关键词: 自动行驶; TPO 路径规划; GPS 导航; 姿态传感器; 物流运输

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)04-0028-07

Design of autonomous driving system for unmanned logistics vehicles

WU Hailun, WANG Kai

(School of Computer and Software, Dalian Neusoft University of Information, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: In order to optimize the logistics terminal distribution method in the campus area, the system analysis and design of the automatic driving logistics vehicle are carried out. The car adopts dual-chip hardware structure with STC89C52RC microcontroller as the motor driving center and STC15F2K60S2 microcontroller as the control center. The angular velocity, acceleration and magnetic field data are collected by the attitude sensor composed of MPU6050 and QMC5883L, and the Azimuth and Yaw Angle are calculated according to the sensor data. The navigation function is realized through the longitude and latitude coordinates of GPS module, TPO three-point optimization path planning program, automatic driving program and attitude sensor Angle data. The control center runs the navigation program to send the control command, and the motor driving center converts the electric signal to control the movement of the intelligent vehicle after receiving the command. The experimental results show that the intelligent vehicle can finish the path planning and automatic driving functions, and the mean deviation of the trajectory from the target path is 0.95 meters, and the maximum is 2.24 meters, which effectively completes the logistics transportation task between endpoints in the campus area.

Key words: automatic driving; TPO path planning; GPS navigation; attitude sensor; logistics transportation

0 引言

在大学校园等实行门禁的特殊区域内普遍存在“最后一公里”的问题, 末端人工配送采用高频次、分散的配送作业模式, 存在效率低下、成本较高和管理难度大等问题^[1]。近年来随着互联网经济兴起与消费需求的日益增长进一步加大了物流系统的运营压力。电商和物流公司为寻求解决方案, 通过丰富区域内物流配送手段, 开发适配的无人物流车来

应对这一挑战。在无人配送机器人“卧龙一号”获得国内首批无人配送车车辆编码“JD0001”后, 利用无人车或配送机器人开展配送服务, 被视为未来高效解决物流问题的有效途径^[2]。然而高成本是目前阻碍无人物流车在市场上普及的主要因素之一, 主要包括无人物流车生产制造成本、运维成本与部署成本, 因此需要从设计的源头控制生产成本、简化使用流程、从而降低整体运营成本^[3]。

因此, 本文设计了一款 GPS 导航^[4] 自动行驶物

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目(S202413631038)。

作者简介: 吴海伦(2002—), 男, 本科生, 主要研究方向: 嵌入式控制系统。

通信作者: 王 凯(1980—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 嵌入式系统软件开发, 移动互联网开发。Email: wangkai2006@neusoft.edu.cn。

收稿日期: 2024-06-16

物流车。该车采用 GPS 模块和姿态传感器获取经纬度信息和运动姿态数据, 结合 TPO (Three Points Optimization) 路径规划算法及自动行驶程序实现物流车自动行驶控制。结合现有芯片性能开发简化版 GPS 导航程序, 其成本仅为采用传统 GPS 技术以树莓派为主控板的无人车的 60%^[5], 成本低廉, 增加了无人物流车在物流机器人市场中的普及及可行性^[6]。

1 系统总体设计

本文对物流车从硬件和软件两方面进行分析与设计, 在保证自动行驶精度在预期范围内的前提下, 尽可能降低系统材料成本及功耗。控制与驱动模块以 STC89C52RC 单片机^[7]为驱动中心, 主控中心采用 STC15F2K60S2 单片机。传感器模块结合 ATK121-8BD 型号 GPS 导航、MPU6050 陀螺仪、QMC5883L 磁力计, 由上述传感器采集的 GPS 经纬度坐标、方位角和偏航角等数据通过通信模块传输至主控中心。主控中心接收传感器数据后, 先运行 TPO 路径规划程序, 依据坐标数据完成路径规划, 再通过自动导航行驶程序^[8]分析方位角、偏航角和目标路径数据, 生成控制指令, 驱动中心根据控制指令驱动电机实现, 物流车自动行驶。设计蓝牙通信装置控制物流车运动^[9], 简化路径记录流程, 并从手机上位机软件获得数据反馈; 其次设置按键电路, 实现智能车不同运行模式的切换; 电源模块为整个系统提供供电支持。总体设计框架如图 1 所示:

部分构成。电路模块包含姿态传感器、数据控制中心、按键电路和电机驱动部分。车体模块由载物筐和底盘组成, 该物流车实验样机如图 2 所示:



图 2 物流车实物图

Fig. 2 Physical picture of logistics car

2.1 姿态传感器电路设计

本设计的姿态传感器由 MPU6050 陀螺仪和 QMC5883L 磁力计组成, 可实时输出角速度、加速度和磁场数据^[10], 主控中心通过 IIC 协议与 16 位 AD 转换器采集上述数据用于 GPS 导航系统程序。由于 MPU6050 陀螺仪在温度等环境因素影响下存在零点漂移特性且其加速度计的累计误差呈指数级增长^[11], 同时磁力计采集的磁场数据易受环境中的金属物体影响^[12], 因此在使用前需要先通过椭球拟合对磁力计进行磁场误差补偿^[13], 再使用 Mahony 姿态算法融合数据^[14]和 GPS 经纬度解算方位角和偏航角^[15]。姿态传感器电路如图 3 所示, 两个传感器的 SDA 引脚与 STC15F2K60S2 单片机的 P15 引脚、SCL 引脚与 P14 引脚连接, 通过 IIC 协议完成数据的读取。

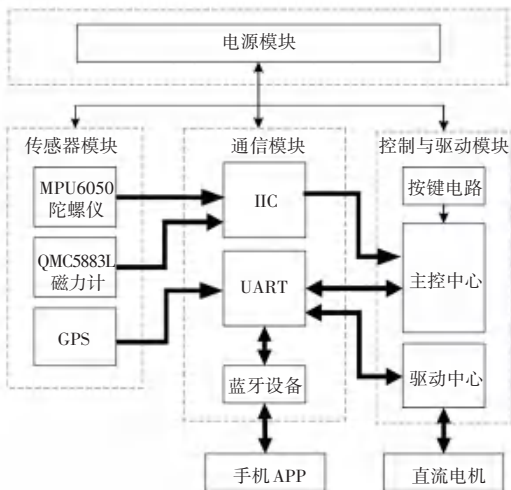


图 1 总体框架图

Fig. 1 General structure diagram

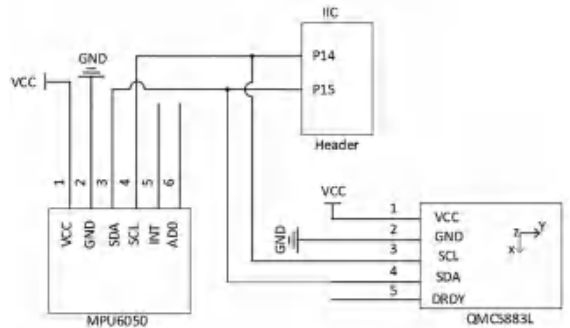


图 3 姿态传感器电路图

Fig. 3 Posture sensor circuit diagram

2.2 数据控制中心硬件设计

数据控制中心电路设计如图 4 所示, 为达到降低成本这一目的, 负责数据处理的控制中心采用 STC15F2K60S2 作为主控芯片。根据现有主控芯片性能, 选取适配的 ATK1218-BD 型号 GPS 设备, 用于经纬度坐标点信息的采集。其具有启动速度快、

2 物流车硬件系统设计

物流车硬件系统主要由电路部分与车体模块两

数据传输丰富、坐标点精度高等特点,可通过 UART 总线向控制中心传输坐标数据。该模块共引出 4 个核心引脚,分别为 VCC(电源正极)、GND(接地)、TXD(发送端)和 RXD(接收端)。其中 TXD 和 RXD 是串口 UART 通信所需要的接口,与 STC15F2K60S2 单片机 UART1 接口的 RXD 和 TXD 引脚交叉相连。主控中心采集并处理 GPS 和姿态传感器数据后,通过 UART2 接口向驱动中心 STC89C52RC 发送控制指令。

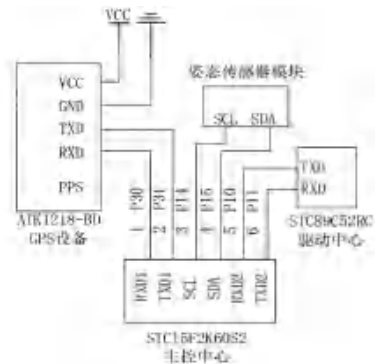


图 4 数据控制中心电路图

Fig. 4 Data control center circuit diagram

2.3 按键电路设计

按键电路主要实现智能车的模式切换与功能操纵。其中,K1 键用于结束路径记录;K2 键用于开始路径记录;K3 键控制物流车启程行驶;K4 键实现物流车返程功能。如图 5 所示,4 个按键左端共地,右端分别与与主控中心 STC15F2K60S2 单片机的外部中断引脚 P32、P33、P36 和 P37 连接。

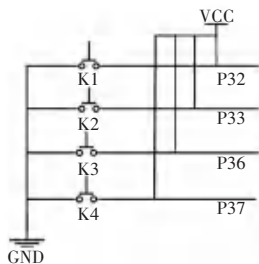


图 5 按键电路设计

Fig. 5 Design of key circuit

2.4 电机驱动电路设计

电机驱动电路采用两个 L298N 电机驱动板实现对左右四路直流电机的控制^[16],受到电源模块的直接供电向电机提供 12 V 供电,并向单片机以及其他传感器部件提供 5 V 以内的供电。L298N 的 OUT 引脚与直流电机的正负极连接,IN 逻辑输入引脚与之对应,决定电机的正转、反转或停转。ENA 和

ENB 为使能通道引脚,接收来自驱动中心的 PWM 信号驱动电机。P1 端为驱动中心单片机 STC89C52RC 用于连接电机驱动板的引脚;其中 P2.0 与 P2.1 同右路驱动板的 ENA、ENB 引脚连接;P0.0~P0.3 同右路驱动板的 IN1、IN2、IN3 和 IN4 引脚连接。右路电机电路如图 6 所示:

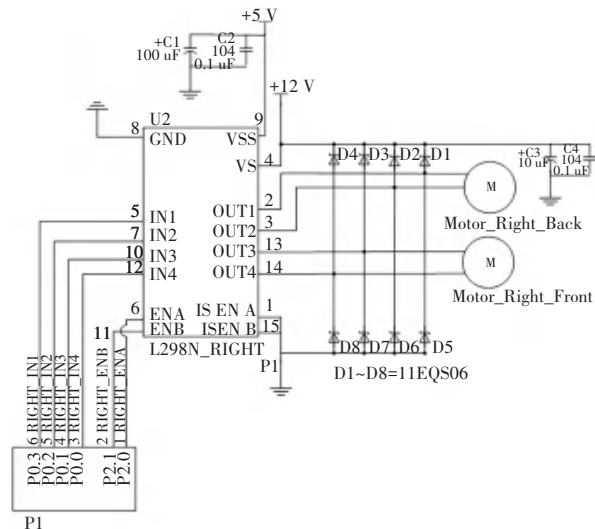


图 6 电机驱动电路图

Fig. 6 Motor drive circuit diagram

3 软件系统设计

3.1 主控中心软件流程

主控中心(STC15F2K60S2)程序流程如图 7 所示。物流车开机第一步进行 ATK1218-BD、QM-C5883L、蓝牙等装置的初始化。第二步运行按键程序检测智能车运行模式是否发生切换,各运行模式根据工作标志位 workFlag 进行定义,具体含义见表 1。

表 1 工作标志位含义表

Table 1 WorkFlag bit meaning table

工作标志位 workFlag	相应含义
0	记录模式
1	结束准备
2	记录结束
3	静默模式
4	启程模式
5	返程模式

记录模式、结束准备模式和结束记录模式均为智能车路径记录过程中的核心模式。启程模式和返程模式则用于实现物流车在起点与终点之间的自动往返功能。静默模式表示物流车处于静止状态,该模式下系统只接收 GPS 数据不执行数据处理操作。

当物流车在接收到 GPS 数据后,将根据工作模式 workFlag 的取值进行判断,选择启动 GPS 数据处理程序完成 GPS 路径数据的记录,或调用 GPS 导航程序实现物流车的自动行驶。

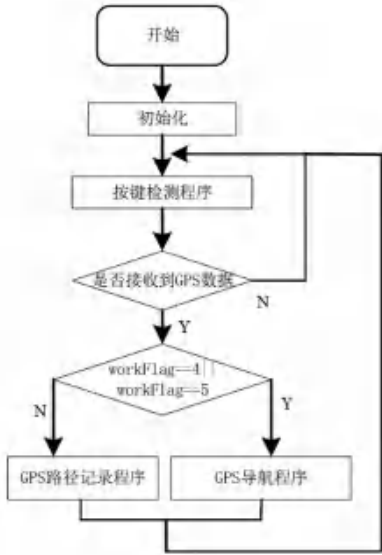


图 7 主控中心软件流程图

Fig. 7 Master control center software flow chart

3.2 按键检测程序设计

按键程序设计的目的在于简化使用操作,实现物流车运行模式切换。如图 8 所示,当按键被按下时将触发主控中心单片机外部中断^[17]。工作标志位 workFlag 的取值将根据决策中心单片机中断程序完成相应转换,进而实现物流车运行模式的切换。图 5 中的按键 K1、K2、K3 和 K4 分别对应外部中断 0、中断 1、中断 2 和中断 3 服务程序。

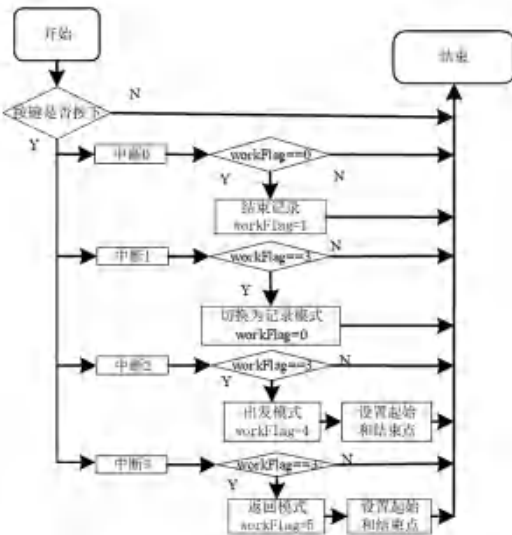


图 8 按键检测程序流程图

Fig. 8 Key detection program flow chart

3.3 TPO 路径记录程序

当 NEMA-0183 协议^[18]格式的 GPS 数据项成功被控制中心接收,且表 1 中的工作标志位 workFlag 为 0 时,控制中心判断坐标数据达到存储条件要求且通过 TPO 路径优化后存储在路径数组(路径数组指存储路径坐标点信息的结构体数组)中。当 workFlag 切换为 1 时,代表智能车进入结束准备状态;完成最后一个坐标点记录后 workFlag 切换为 2,记录结束;然后智能车进入静默模式 workFlag 切换为 3。路径数组单元结构如下所示:

```
typedef struct { //8Byte
    unsigned int angle_after_frontPoint;
    unsigned int angle_to_nextPoint;
    double latitude;
    double longitude;
} GPS_INFO;
```

基于降低物流车成本造价的设计目标,在保证 GPS 路径数据精度不影响实验结果的前提下,选用性能符合实验需求的 STC15F2K60S2 单片机的 SRAM 作为路径数组的存储位置。为优化软件系统目标路径数组规模,设计 TPO (Three Point Optimization) 三点优化路径程序以降低数组对于系统空间的占用,单个路径数组单元占用内存容量为 8 Byte,控制中心所使用的单片机 SRAM 内存为 2 KB,根据软件程序设计,划分给路径数组的内存空间可存储 70 个坐标点,结合实验测试场地(面积约两个篮球场大小)和三点路径优化程序能有效减少坐标点记录数量,优化后该数组容量能够满足实验任务需求。

TPO 路径优化是对路径数组数据和物流车实时经纬度数据进行综合系统处理,通过对路径数组末尾两点坐标和实时经纬度坐标点之间的距离^[11]和方向角度关系进行计算判断,根据预设标准决定是否存储当前坐标。TPO 路径程序原理如图 9 所示:

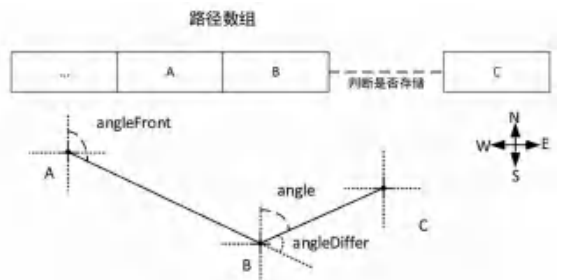


图 9 TPO 路径优化原理图

Fig. 9 Schematic diagram of TPO path optimization

假设点 C 为物流车现在所处坐标,点 B 和点 A 为路径数组记录的最后一个和倒数第二个坐标。当角 angleFront 和 angle 的差值角 angleDiffer 超过预设标准 10 度,且坐标点 C 与点 B 的距离达到预设标准距离 1 m,判定坐标点 C 被路径数组存储。实验证明,此方法在节省路径数组存储空间方面表现突出,如图 10 所示。

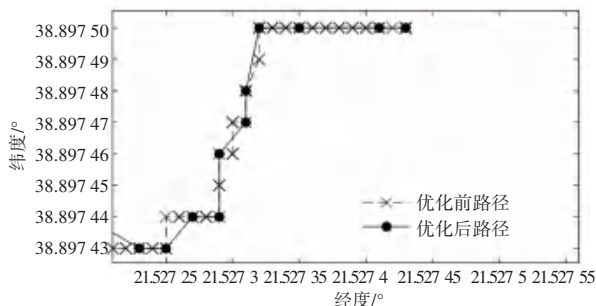


图 10 路径优化效果图

Fig. 10 Path optimization effect diagram

图中优化前路径数组记录坐标点数量为 29 个,优化后为 11 个,优化后坐标点数量减少约 62%。路径优化程序在不影响实验设计路线记录的前提下,对路径数组的优化效果显著,节省了 66% 用于存储坐标点信息的内存空间。

3.4 GPS 导航程序

GPS 导航程序如图 11 所示,当路径记录工作结束后,按下图 5 中的 K3 或 K4 按键,智能车将转换为启程或返程模式,设置路径数组下标起点 gpsStartIndex 和终点 gpsEndIndex 。当物流车处于启程模式时, gpsStartIndex 指向路径数组第一个单元, gpsEndIndex 的值为路径数组的长度,指向数组末尾,即最终目的坐标,返程模式的下标设置则与启程模式相反。控制中心收到来自于 GPS 数据后直接用于导航程序,当计算出目前坐标与 gpsStartIndex 下标指向的目标坐标点之间的距离后,会判断物流车目前所处位置。如果未到达最终坐标, gpsStartIndex 下标自动前移或后移一位,指向路径数组中下一个目标坐标。如果到达终点或起点,导航程序结束物流车进入静默模式 workFlag 切换为 3,反之控制中心会一直根据目标坐标计算方位角和偏航角,经过指令转化后,向驱动中心发送控制指令。

3.5 电机驱动程序设计

驱动中心选用 STC89C52RC 型号单片机作为控制单元,设备开机后,驱动中心首先完成串口初始化操作,当接收到来自控制中心或手机 APP 的指令后,驱动程序将指令转化成电信号,通过使能 L298N

电机驱动板实现对四路直流电机的控制^[19],指令与电机动作的对应转化见表 2。

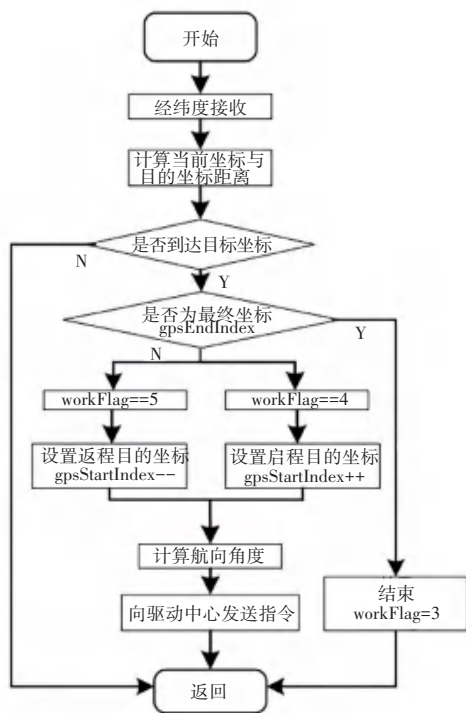


图 11 GPS 导航程序流程图

Fig. 11 GPS navigation program flow chart

表 2 指令转化表

Table 2 Instruction translation table

指令	指令含义
run	直行
left	左转
right	右转
stop	停止
turnl	原地左转
turnr	原地右转
start	记录开始
end	记录结束

4 实地测试

4.1 实验流程

实验选用正点原子的 ATK1218-BD 型号的 GPS 模块,该模块通信协议为 NEMA-0183,冷启动时间 29 s,供电电压 3.3 V,实验采样率 4 Hz,通过控制中心 STC15F2K60S2 单片机的 UART1 接口向其提供经纬度数据。如图 12 所示,控制中心从 UART1 接口采集并处理 GPS 和姿态传感器数据后,向驱动中心发送控制指令,实现物流车自动行驶;蓝牙装置通过 UART2 接口与控制与驱动模块通信,实

时向上位机反馈经纬度、距离、设备状态信息等实验数据。

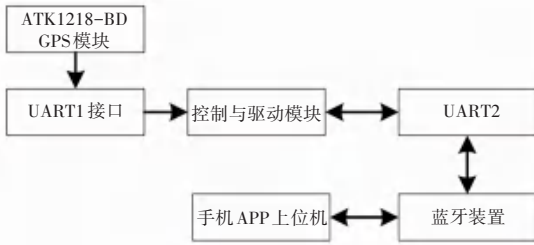


图 12 数据流向图

Fig. 12 Data flow diagram

实验过程中,首先通过蓝牙控制物流车对实验场地进行路径数据采集,当完成路径数组的记录后,按下启程或返程按钮,物流车在预先规划的目标路径上自动行驶。实验采集路段卫星图示如图 13 所示,对现实环境中的直路和弯路预处理,其整体呈勺型。

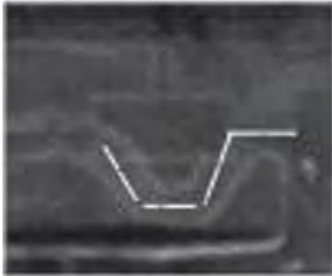


图 13 实验场地图片

Fig. 13 Experimental site picture

4.2 实验结果

在 4 Hz 采样率下,实验结果如图 14 所示,图中虚线代表智能车记录的目标路径,实线代表智能车实际行驶路径。由于 STC15F2K60S2 芯片处理浮点能力有限,经纬度整数位精度在小范围实验内影响较小,小数部分精度对实验结果影响显著,因此设计从经度的整数十位开始处理数据,保证经度信息小数点后 5 位数据精度不受损失。以 X 轴经度为例,图中标注的 21.527 1°实际为 121.527 1°。

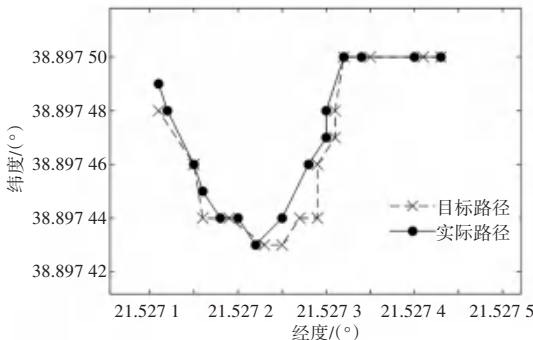


图 14 路径对比图

Fig. 14 Path comparison map

从图 14 中实际路径第一个坐标至右边最后一个坐标,计算每个坐标与目标路径坐标之间的偏差距离。其偏差距离分布的柱状图如图 15 所示。

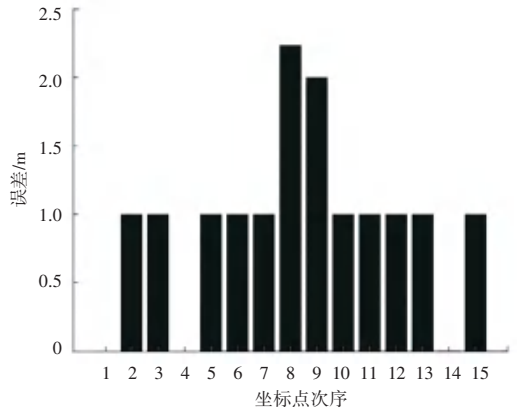


图 15 偏差柱状图

Fig. 15 Deviation bar chart

通过球面距离公式^[20]计算可得,最大数据偏差在经度 21.527 25°至 21.527 30°之间,目标路径与实际路径偏差为 2.24 m;最小偏差在经度 21.527 3°至 21.527 45°之间,实际路径和目标路径重合。对比目标路径轨迹和实际路径轨迹,GPS 智能车在起点与终点之间自动行驶轨迹相符,且数据偏差在 0~2.4 m 之间,平均误差为 0.95 m,其实际表现符合物流车在端点间自动行驶的实验要求。

5 结束语

本文设计了一款 GPS 自动行驶物流车,对物流车的硬件与软件系统进行分析。结合手机上位机蓝牙通信系统、TPO 路径优化程序和 GPS 导航程序,实现控制智能车路径记录和端点间自动行驶功能。实验结果表明智能车能够从起点自动前往终点并返程,完成物资运输丰富区域内物流运输方式。该系统相较现有物流车方案成本更低,具有易开发、易维护、易使用和易普及等优势,能够担任区域中物流系统的基本单位,解决系统末端配送效率低下、成本高和难以管理的问题。

然而,该系统仍存在待完善的部分。其一,实验结果部分,选取的实验场地范围较小,所产生的实验数据采样点较少,影响了实验整体的采样精度;其二,实验模拟的道路环境与交通状况复杂的现实路段存在差距。针对上述问题,下一阶段开发工作将围绕以下工作展开:更换更高性能芯片,加入激光雷达和摄像头等用于检测周遭环境数据的传感器,实现基于神经网络 DRL(Deep Reinforcement Learning)自动行驶物流车,并实施大范围现实路段实验,确保

其能在复杂环境中运行。

参考文献

- [1] 周云龙, 崔丽冰, 陆武志, 等. 校园智能无人配送小车的设计与实现[J]. 物联网技术, 2023, 13(5): 126-128. DOI: 10.16667/j. issn. 2095-1302. 2023. 05. 035.
- [2] 周妍. 高校校园机器人选型及配送路径优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024. DOI: 10. 27140/d. cnki. ghbbu. 2023. 000950.
- [3] 糟娅梅, 卜香婷, 马洁茹, 等. 智能快递车在高校中的多元化应用模式设计策略[J]. 绿色包装, 2021, 13(11): 123-126. DOI: 10. 19362/j. cnki. cn10-1400/tb. 2021. 11. 024.
- [4] 苏素燕, 陈金旺, 王林芳, 等. 室内外定位技术综述[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(10): 179-183.
- [5] 郑阳, 陈美玲, 李欣鹏, 等. 基于 GPS 导航技术的智能无人快递车技术研究[J]. 通信电源技术, 2020, 37(1): 247-248. DOI: 10. 19399/j. cnki. tpt. 2020. 01. 103.
- [6] 李川鹏, 王秀旭. 浅谈低速无人车发展现状、挑战及建议[J]. 时代汽车, 2022, 39(2): 23-24.
- [7] 蒙欢, 李泽滔. 基于单片机 AT89C51 的数字电压表显示[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(2): 133-136.
- [8] 陈治瑀. 基于卫星导航的农机自动驾驶控制技术研究[J]. 农机使用与维修, 2022, 35(4): 38-40. DOI: 10. 14031/j. cnki. njwx. 2022. 04. 011.
- [9] 韦才晶, 洗灿灿, 李甜甜, 等. 浅谈基于疫情下的智能消杀小车系统的设计与实现[J]. 中国设备工程, 2024, 35(1): 34-36.
- [10] 李素敏, 王刚刚, 申志飞. 地磁定位导航应用和效能分析[J]. 全球定位系统, 2023, 48(6): 42-51. DOI: 10. 12265/j. gnss. 2023141.
- [11] 陈出新, 周雨辰, 王晨晨, 等. 基于双频 GPS 定位和陀螺仪姿态解算与霍尔传感器的多数据融合滤波定位算法研究[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(8): 125-126.
- [12] 苏忠奇. 井间旋转磁场建模及定位算法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024. DOI: 10. 27400/d. cnki. gxasc. 2023. 000618.
- [13] 左军. 面向无人机的视觉惯性融合定位系统研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023. DOI: 10. 27248/d. cnki. gnjqc. 2023. 000477.
- [14] 杨光耀, 夏振华, 肖一帆, 等. 基于 IMU 和 Mahony 算法的人体手臂关节角度姿态测量系统研究[J]. 电脑知识与技术, 2023, 19(5): 111-114. DOI: 10. 14004/j. cnki. ckt. 2023. 0265.
- [15] 王辉, 朱国鹏, 郭剑东. 基于惯性测量单元的旋挖钻机钻具姿态测量方法[J]. 机械与电子, 2024, 42(5): 69-75.
- [16] 李鹏. 基于 L298N 的直流电机调速系统[J]. 电子测试, 2022, 36(21): 37-40. DOI: 10. 16520/j. cnki. 1000-8519. 2022. 21. 029.
- [17] 李瑾, 杨昌永. 基于 51 单片机外部中断的亮度可调手电筒设计[J]. 机械工程与自动化, 2024, 33(3): 156-158.
- [18] 韩友美, 钟政, 桑逢云. NEMA—0183 协议下 GPS 数据的实时串口通讯程序设计[C]//山东省“数字国土”学术交流会议论文集. 山东科技大学学报, 2007: 4.
- [19] 唐爱武, 陈天佑. 基于 DCS-惯性权重组合的柔性机械臂运动轨迹控制系统研究[J]. 电气传动, 2024, 54(2): 74-81. DOI: 10. 19457/j. 1001-2095. dqcd24845.
- [20] 樊东卫, 何勃亮, 李长华, 等. 球面距离计算方法及精度比较[J]. 天文研究与技术, 2019, 16(1): 69-76. DOI: 10. 14005/j. cnki. issn1672-7673. 20180523. 001.