

基于 ROS 的冷链配送机器人设计

任工昌, 胡小龙, 刘朋, 吴梦珂
(陕西科技大学 机电工程学院, 西安 710021)

摘要: **目的** 针对我国日益增长的冷链配送需求, 解决短途冷链运输过程中“断链”的问题。**方法** 设计一种采用拖车式结构的冷链配送机器人, 同时基于 ROS (Robot Operating System) 设计了冷链配送机器人的控制系统。控制系统的下位机使用 STM32 控制器, 实现机器人的运动控制, 上位机使用 Mini PC 为核心, 对算法中的回环检测方法进行改进。**结果** 该机器人能够实现随时自动更换配送拖车及取物的功能, 并实现了机器人的建图及导航功能。**结论** 实验表明, 该冷链配送机器人在长廊等相似特征值较多的环境中的导航避障较为及时准确, 达到了实用要求, 可实现短途冷链配送的需求。

关键词: ROS; 冷链配送; 拖车结构; 建图; 导航

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)03-0194-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.030

Design of Medical Distribution Robot Based on Robot Operating System

REN Gong-chang, HU Xiao-long, LIU Peng, WU Meng-ke

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xian 710021, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve the problem of "broken chain" in the short-distance cold chain transportation process in response to China's growing demand for cold chain distribution. A cold chain distribution robot with a trailer structure was designed. At the same time, a control system of the cold chain distribution robot was designed based on the Robot Operating System. The STM32 controller was used to the lower computer of the control system to realize the motion control of the robot. The Mini PC was used as the core of the upper computer to improve the loop detection method in the algorithm. The robot could automatically change the function of the delivery trailer and the object at any time, and realize the mapping and navigation functions of the robot. Experiments show that the cold chain distribution robot is timely and accurate in the environment with similar feature values such as the promenade. It meets the practical requirements and can realize the short-distance cold chain distribution.

KEY WORDS: ROS; cold chain distribution; trailer structure; mapping; navigation

目前,随着我国物流行业的发展,冷链物流作为其中一个重要部分越来越受到各企业的关注。冷链物流主要实现乳制品、时令果蔬等生鲜品^[1]及特殊药品^[2]的物流运输。实际上,多数产品现在仅仅在仓库存放期间实现了冷藏,但短途或短时间的运输过程仍是在常温环境下进行,产品的鲜度及品质难以保证^[3],尤其是在室内环境中的冷链物流往往得不到重

视。随着中国工业 4.0 的来临,机器人开始参与冷链技术,而智能冷链运输^[4]也是行业内的前沿热词。冷链配送机器人可作为智能冷链物流的一个重要环节,实现短途的冷链运输。国内对于冷链配送的需求如此之大,但目前出于成本原因,仅有少数几家公司有针对医院特殊药品的冷链配送,其他方面仍十分短缺。

冷链配送机器人是以移动机器人为基础,为适应

收稿日期: 2019-07-21

作者简介: 任工昌 (1962—), 男, 硕士, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为产品创新理论。

冷链运输而开发的一种物流机器人,可代替工作人员完成配送任务。冷链配送机器人的关键在其车体及箱体结构、控制系统等方面。冷链配送任务繁重,采用单车体结构的机器人配送量较小,同时冷链配送机器人的成本较高,而采用可更换的拖车式结构可一次性配送更多物品,效率更高^[5],且可实现一车多用的功能。采用 ROS 作为机器人的控制系统,可实现机器人的多次实验及开发。文中以自主搭建的通用机器人底盘为基础,对采用离轴式拖车的冷链配送机器人的关键结构及基于 ROS 的控制系统进行设计,并对定位算法进行优化,最终实现机器人的自主避障、定位导航等功能,可完成机器人冷链配送、一车多用及自动取物的功能。

1 冷链配送机器人结构及硬件设计

采用拖车式的机器人结构,其结构可分为牵引车头及拖车部分。

1.1 冷链配送机器人拖车结构设计

针对拖车部分的结构,主要依据机器人更换配送拖车及安全取物、配送的功能进行设计。为实现冷链配送机器人更换拖车的功能,设计了一种模块化的拖车自动连接结构,可在通用机器人底盘实现,见图 1a。该结构可实现冷链配送机器人在配送任务繁重的情况下更换拖车的功能,且结构简单,便于安装,实现一机多车的功能。

该结构主要由机架、摇杆-滑块机构、电磁装置和拖车连接杆组成,并以拖车连接杆的相对位置分为退出和连接 2 种状态,见图 1b 和 c。在退出状态下,摇杆-滑块机构作为锁止装置将固定装置锁止,同时,电磁装置处于断电状态,该结构处于静态。在退出状态改变为连接状态时,拖车连接杆直接推动摇杆-滑块机构动作,使固定装置处于自由状态,在弹簧力及自身重力作用下移动,到达位置后和机架同时对连接杆起固定作用,完成状态改变;此过程中该结构处于

动态。在连接状态下,该结构处于静态。在连接状态改变为退出状态时,电磁装置处于通电状态,因而产生电磁力作用于铁芯,带动固定装置发生位移,此时,连接杆被释放为自由状态;连接杆退出后,摇杆-滑块机构被释放,在弹簧力作用下回程,重新将固定装置锁止;电磁装置变为断电状态,即完成状态改变,此过程中该结构为动态。

为实现冷链运输过程中的安全取物及配送功能,设计了一种带机械臂的配送机器人的车厢存储结构,见图 2。

该结构采用全封闭的结构,内设有温度控制系统,采用单独的电路支持。将配送物品装入标准储物箱后采用机械臂装车、人工取物的方式,保证运送物品的安全。设置了平行分布的单层货架,且每层货架设置有存放若干个标准储物箱的存储柜,每个存放标准储物箱的存储柜均设有车厢取货门,每层的隔板可以自动翻转或上下移动,简化了自主配送机器人用机械臂存放物品的运动轨迹,提高了其自动化程度。

以所设计的拖车连接结构和车厢结构为基础,拖车式机器人的总体硬件连接结构见图 3。

1.2 冷链配送机器人控制系统的硬件设计

使用自主搭建的通用机器人底盘为基础,实现机器人控制系统硬件的设计。其硬件连接见图 4。

为实现远程控制的需要,系统采用上下位机的结构。上位机由主 PC、无线路由器和车载 PC 组成,主 PC 和车载 PC 可通过无线路由器建立的局域网实现数据的互传。下位机以 STM32 单片机为核心,通过电机驱动模块实现对 2 个差速驱动轮的实时控制;2 个驱动轮分别带有二进制光电编码器,可将运动数据反馈至单片机中,实现对驱动轮的闭环控制。上位机与下位机之间采用串口通信的方式实现数据的双向传递。机械臂位于车厢后端,设置有专用控制器,与车载 PC 通过蓝牙连接,从而实现机器人自主取物的控制。

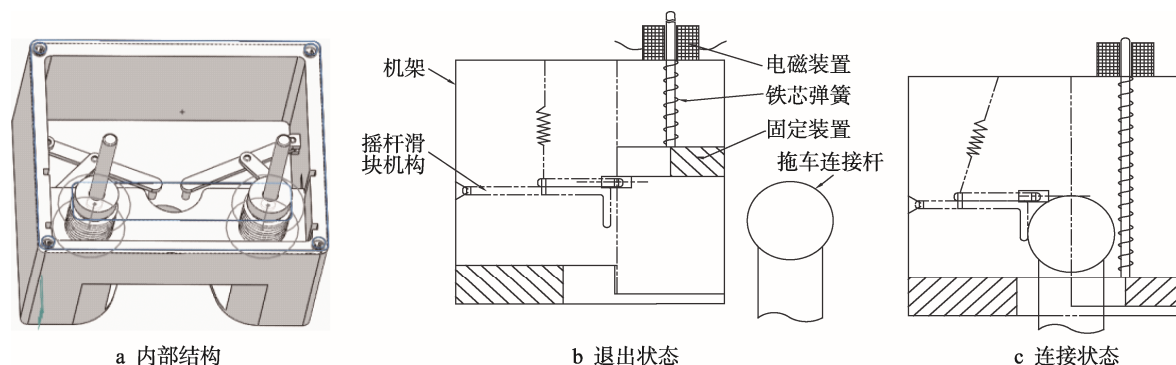


图 1 拖车连接结构

Fig.1 Structure of trailer connection

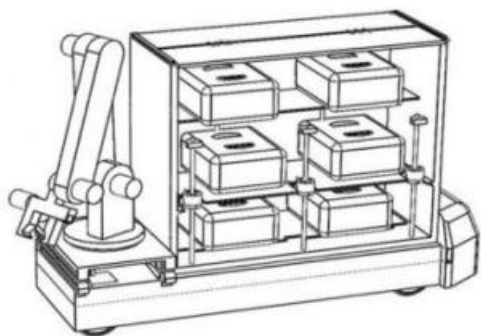


图2 车厢存储结构
Fig.2 Structure of cabin storage

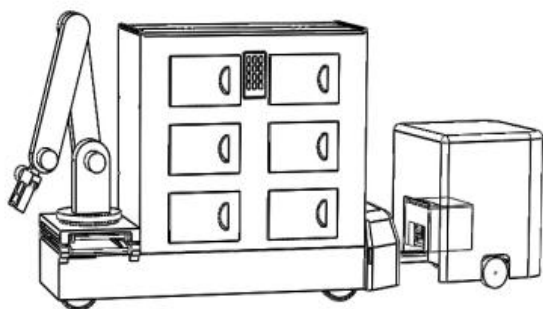


图3 冷链配送机器人结构
Fig.3 Structure of cold chain distribution robot

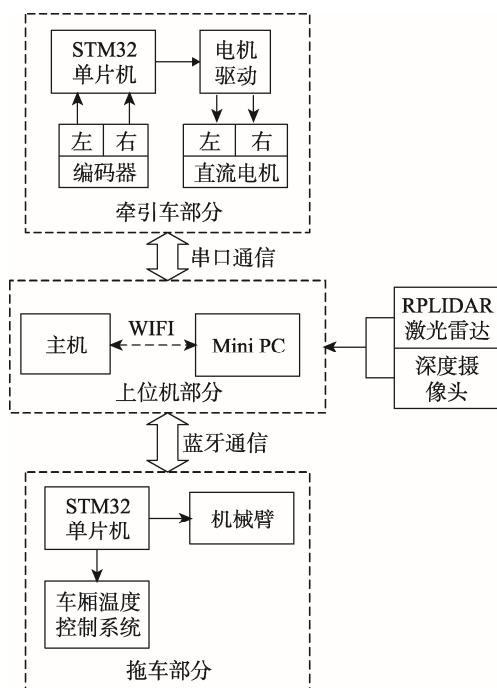


图4 控制系统硬件连接
Fig.4 Hardware connection of control system

激光雷达采用 RPLIDAR A2 雷达,它基于三角测距系统,可对周围环境扫描测距检测,产生所在空间的平面点云地图信息^[6],从而获得周围环境的轮廓图。该设备与车载 PC 直接连接,将扫描数据直接发送至上位机处理。

2 冷链配送机器人软件系统设计

软件系统也采用上下位机的结构。在上位机中,主机和 Mini PC 均搭载 Ubuntu 系统,并安装了对应版本的 ROS 系统,两者之间采用 ssh 登录方式实现通信;在下位机中,STM32 采用串口通信方式实现与上位机的数据互传,并通过 PID 算法实现对电机的实时控制;车厢专用控制器仍以 STM32 为核心,与上位机通过蓝牙连接,同时,也是车厢温度控制系统的核心。

2.1 下位机软件部分设计

下位机软件主要包括 2 个功能模块:电机控制部分,主要控制电机的启停,并通过增量式 PID 控制算法实现电机速度的无级调节,对两轮的的运动误差适当调节;上下位机通信部分,实现向上位机反馈当前运动数据和接受上位机速度指令的功能,见图 5。

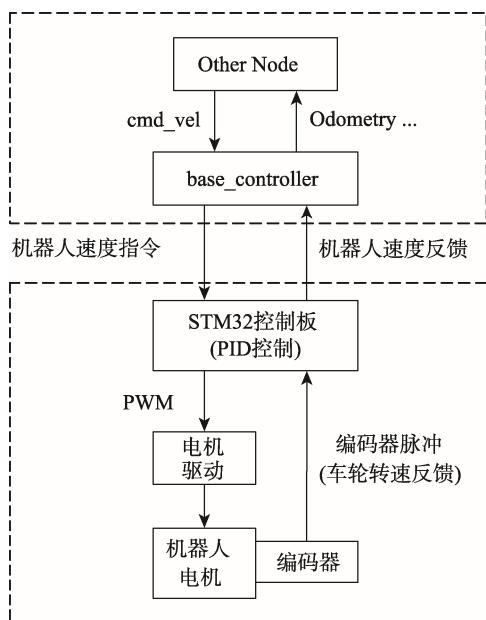


图5 下位机的运动控制
Fig.5 Motion control of lower computer

对上位机发送当前运动数据需要将两驱动轮反馈的编码器数据进行计算,得到移动机器人控制点在当前位置的线速度及角速度信息(即里程计信息),再通过串口发送至上位机;接收上位机发送的速度指令需要将接收到的速度指令进行解算,并通过 PID 算法计算得到控制电机速度的 PWM 数据。

车厢的下位机软件包括 3 个功能模块:机械臂舵机的控制部分,通过 PWM 控制舵机的运动实现;上下位机通信部分,实现数据的互传;车厢温度控制部分,可实现车厢的恒温控制。

2.2 上位机软件部分设计

上位机软件采用基于分布式处理框架的 ROS 系统,主要包括 3 个功能模块:采用相应的传感器功能

包对采集的信息进行处理；机器人的建图功能，采用基于图优化方法的 Cartographer 实现；机器人的导航功能，采用 move_base 及 amcl 功能包实现。

2.2.1 传感器信息的采集与处理

通用机器人底盘的传感器信息主要由里程计数据和激光雷达数据构成。其中，里程计数据即移动机器人的线速度和角速度，主要依赖下位机中的编码器来获取；激光雷达数据即当前时刻下周围环境的二维扫描数据，依赖 RPLADAR 来获取。对里程计信息和激光雷达信息进行坐标转换可完成机器人的位姿估计，并在帧间匹配过程中对累计误差进行修正；物品的自动抓取主要依靠深度摄像头来实现信息获取，它可以将物品的深度信息即离目标的距离直接计算出来。

2.2.2 长廊环境下建图功能的实现

机器人的建图功能主要依靠基于图优化方法^[7]的 Cartographer^[8]功能包实现。Cartographer 功能包作为谷歌发布的开源建图算法包，已经引起广泛的关注及应用。其设计目标是实现低计算资源消耗、实时优化，但不追求高精度，因而满足冷链配送等服务机器人行业的实用要求。Cartographer 将 SLAM 分为局部 SLAM 即前端，和全局 SLAM 即后端^[9]，见图 9。在局部 SLAM 中，Cartographer 引入了子地图的概念，将一定数量的扫描数据构成子地图，并根据已有传感器数据估计出当前扫描数据在子图中的最佳位置，并将其插入，以此不断更新，构成完整的子地图。由于随时间推移，子地图之间的累计误差增大，因此在全局 SLAM 中，Cartographer 使用回环检测优化各子图的位姿以消除累计误差，并在扫描匹配过程中采用了

分枝定界法，加快匹配速度；最后利用 SPA (Sparse Pose Adjustment)^[10]完成全局的位姿图优化。

在实际建图过程中，室内存在如长廊等相似特征值较多的环境，从而导致最终回环检测添加的约束不正确，影响建图效果，因此，提出一种基于里程计数据的回环检测方法，即在进行回环检测时考虑到里程计数据的匹配，可有效减少扫描匹配过程中对相似特征的识别匹配问题。

$$\arg \min_{\Xi_m, \Xi_s} \frac{1}{2} \sum_{ij} \rho \left(E^2 \left(\xi_i^m, \xi_j^s; \Sigma_{ij}, \xi_{ij} \right) \right) \cdot \beta \quad (1)$$

式中： ξ_i^m 表示子地图位姿； ξ_j^s 表示扫描位姿； Σ_{ij} 表示子地图与扫描的相对位姿； ξ_{ij} 表示相关协方差矩阵； E 表示约束残差； ρ 表示损失函数。在回环检测过程中加入里程计数据的匹配系数 β ，里程计数据越匹配，系数越接近于 1，则添加的回环约束正确；反之，越接近于 0，则添加的约束不正确。但在实际实验中，里程计数据不可能完全匹配，故取匹配系数 $\beta > 0.8$ 以上就可以判断为里程计匹配。

该算法在原有算法中加入了一个变量，但计算复杂度仍未改变，建图时闭环检测可通过实验与原有算法对比。

2.2.3 长廊环境下导航及配送功能的实现

机器人的导航功能需要分别实现路径规划及定位功能。其中，路径规划通过 move_base 功能包实现，具体可分为全局路径规划和局部路径规划^[11]。

全局路径规划是在已有地图中根据起始点及目标点计算出全局路线，这一功能采用迪杰斯特拉算法 (dijkstra)^[12]计算起始点到目标点的最短路径。局部路径规划是根据周围环境进行实时避障规划，这一功

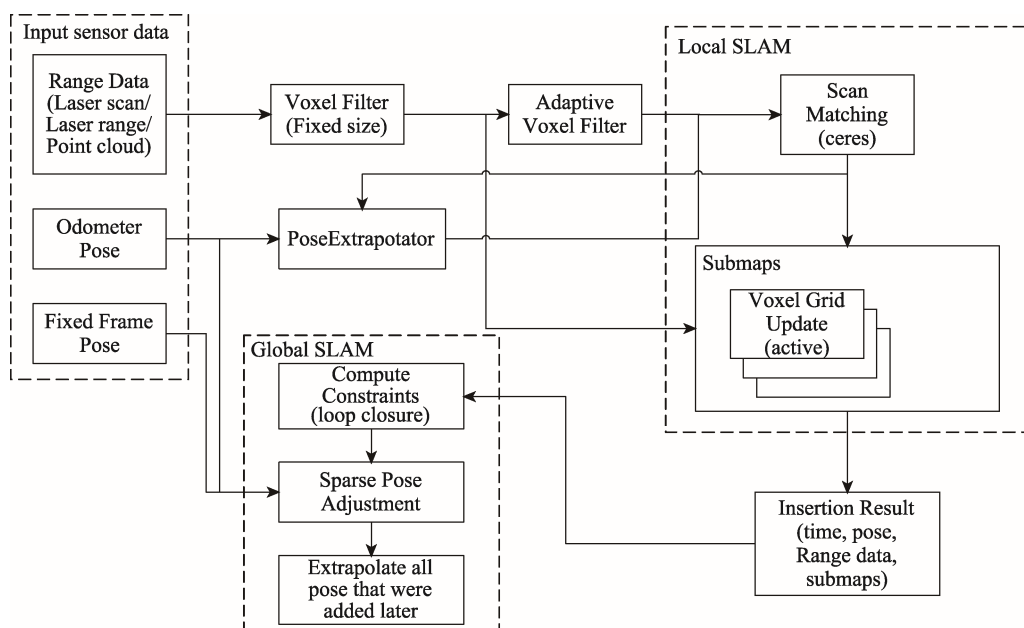


图 6 Cartographer 算法框架
Fig.6 Framework of Cartographer algorithm

能采用动态窗口方法 DWA (Dynamic Window Approaches)^[13-14] 计算最优避障路径及机器人的实时速度和角速度。

导航过程中的定位通过 amcl 功能包实现,它采用了自适应蒙特卡罗定位算法^[15],是机器人在 2D 中移动的概率定位系统。其输入为基于激光的地图、激光扫描和变换消息,输出为机器人的姿态估计,可实现机器人的局部及全局定位。

机器人的配送功能是在导航功能的基础上发展出来的,机器人通过自动导航到达任务点后,远程主机在接收到反馈后会通知用户到任务点取出物品,达到配送的目的。

2.2.4 自动取物及自动更换拖车功能的实现

自动取物功能主要是靠机械臂来实现,将物品放入专用储物箱后,通过深度摄像头识别目标位置信息,最后使用 moveit 功能包控制机械臂运动即可。

机器人自动更换拖车的功能实现需要车头部分在和拖车脱离,远程导航至待更换拖车的位置后,自动与该车厢连接。在连接过程中拖车连接杆要和连接点对齐,为此,牵引车头和拖车部分采用红外对齐,保证车头倒车时与拖车的相对偏差。

3 实验及分析

考虑到室内环境中长廊最为常见,因此实验在长廊环境中进行,分别进行建图及导航实验,利用 RVIZ 可视化工具实时查看实验过程。

3.1 建图实验

为了得到长廊环境较好的二维栅格地图,采用对回环检测优化前后的 2 种 Cartographer 分别进行建图。机器人在建图过程中的长廊环境和建图结果见图 7。其结果说明优化前所建的地图,由于走廊的相似特征值导致多次行程中回环约束不正确,图形漂移较为严重;优化后所建的地图,由于在回环过程中增加了里程计匹配系数,提高了定位精度,并且通过降低局部及全局 SLAM 的延迟来提高定位精度,最终实现了最佳的建图效果,长廊环境中相似特征值的闭环检测问

题得到解决,局部区域的相对偏差由 20%降至 4%。

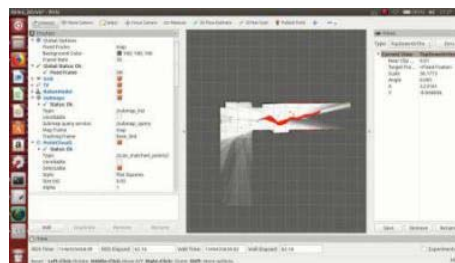
3.2 导航实验

导航地图采用 Cartographer 建立的二维地图,并在走廊放置若干障碍物,以实现机器人避障功能。

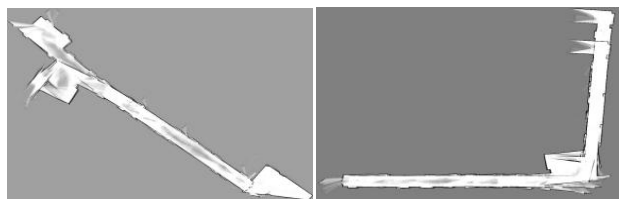
机器人在导航避障过程中的长廊环境和导航过程中的规划路线见图 8。其中,蓝色线条是全局路径



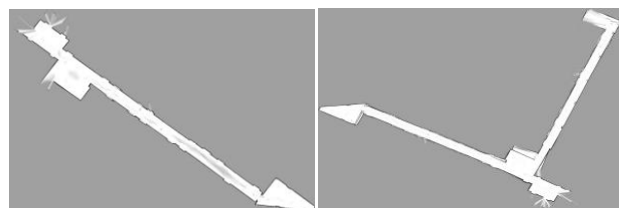
a 长廊建图环境



b 建图 RVIZ 界面



c 优化前 Cartographer 建图结果 (I 型和 L 型长廊)



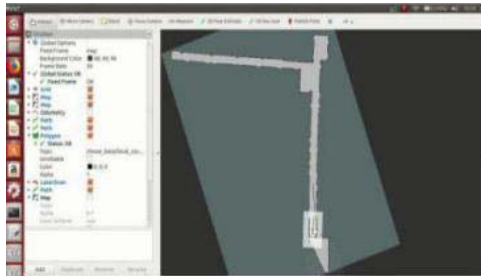
d 优化后 Cartographer 建图结果 (I 型和 L 型长廊)

图 7 建图实验环境和结果

Fig.7 Experiment environment and result of mapping



a 长廊导航环境



b 导航 RVIZ 界面



c 导航规划路线

图 8 导航实验

Fig.8 Experiment of navigation

规划, 红色线条是局部路径规划。其结果说明在长廊环境中, 机器人能够指定目标点实现全局路径规划, 最终到达指定位置, 实现导航功能; 并且在导航过程中能够根据周围环境实时路径规划, 实现避障功能。在导航过程中, 机器人定位较为准确, 可达到医院实用要求。

4 结语

冷链运输的任务需求不同于一般的配送, 所以采用拖车式的机器人结构, 并对冷链配送机器人的拖车连接结构及车厢结构进行设计, 一定程度上解决了冷链配送连续性及机器人成本高的问题; 对冷链配送机器人控制系统进行了设计, 并对建图算法的回环检测过程进行了优化, 对优化前后算法的建图效果进行了对比及分析, 最后利用样机在室内常见的长廊环境中进行了建图、导航及避障的实验, 结果显示移动机器人达到了在室内冷链配送的要求, 为冷链配送机器人的实用方案提供了一定的参考。

参考文献:

- [1] 徐蓁. 生鲜农产品供应链保鲜投入的演化博弈分析与仿真研究[J]. 包装工程, 2019, 40(11): 66—71.
XU Wei. Evolutionary Game Analysis and Simulation Research on the Fresh-keeping Investment of Fresh Agricultural Products Supply Chain[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(11): 66—71.
- [2] 王群, 张然, 林晓明, 等. 山东省冷链药品储存运输的管理现状及对策建议[J]. 中国食品药品监管, 2018(11): 53—57.
WANG Qun, ZHANG Ran, LIN Xiao-ming, et al. Management Status and Countermeasures of Cold Chain Drug Storage and Transportation in Shandong Province[J]. China Food & Drug Administration Magazine, 2018(11): 53—57.
- [3] 董玲玲. 我国冷链物流发展态势、问题与对策——源于商贸流通业发展视角[J]. 商业经济研究, 2019(12): 94—96.
DONG Ling-ling. The Development Situation, Problems and Countermeasures of China's Cold Chain Logistics—From the Perspective of the Development of Trade and Circulation Industry[J]. Journal of Commercial Economics, 2019(12): 94—96.
- [4] 任芳. 智能技术助力冷链物流发展[J]. 物流技术与应用, 2019, 24(S1): 17—19.
REN Fang. Intelligent Technology Helps the Development of Cold Chain Logistics[J]. Logistics & Material Handling, 2019, 24(S1): 17—19.
- [5] 任工昌, 吴梦珂, 朱爱斌, 等. 带单节拖车的机器人控制系统的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2018, 44(11): 41—44.
REN Gong-chang, WU Meng-ke, ZHU Ai-bin, et al. Design and implementation of Robot Control System with Single-section Trailer[J]. Application of Electronic Technique, 2018, 44(11): 41—44.
- [6] 高文研, 平雪良, 贝旭颖, 等. 两种基于激光雷达的SLAM 算法最优参数分析[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(4): 28—30.
GAO Wen-yan, PING Xue-liang, BEI Xu-ying, et al. Optimal Parameter Analysis of Two Lithra-based SLAM Algorithms[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(4): 28—30.
- [7] GRISETTI G, KUMMERLE R, STACHNISS C, et al. ATutorial on Graph-Based SLAM[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2010, 2(4): 31—43.
- [8] 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). IEEE, 2016.
- [9] 梁明杰, 闵华清, 罗荣华. 基于图优化的同时定位与地图创建综述[J]. 机器人, 2013, 35(4): 500—512.
LIANG Ming-jie, MIN Hua-qing, LUO Rong-hua. Summary of Simultaneous Location and Map Creation Based on Graph Optimization[J]. Robot, 2013, 35 (4): 500—512.
- [10] KONOLIGE K, GRISETTI G, KÜMMERLE R, et al. Efficient Sparse Pose Adjustment for 2D mapping[C]// 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 18—22, 2010, Taipei, Taiwan. IEEE, 2010.
- [11] 霍凤财, 迟金, 黄梓健, 等. 移动机器人路径规划算法综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2018, 36(6): 639—647.
HUO Feng-cai, CHI Jin, HUANG Zi-jian, et al. Overview of Mobile Robot Path Planning Algorithms[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2018, 36(6): 639—647.
- [12] 贺长征, 宋豫川, 雷琦, 等. 柔性作业车间多自动导引小车和机器的集成调度[J]. 中国机械工程, 2019, 30(4): 438—447.
HE Chang-zheng, SONG Yu-chuan, LEI Qi, et al. Integrated Scheduling of Multi-Automatic Guided Cars and Machines in Flexible Job Shops[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(4): 438—447.
- [13] 程传奇, 郝向阳, 李建胜, 等. 融合改进 A*算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 137—143.
CHENG Chuan-qi, HAO Xiang-yang, LI Jian-sheng, et al. Global Dynamic Path Planning Based on Improved A* Algorithm and Dynamic Window Method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 137—143.
- [14] 陈光明, 曾碧, 吕凌. 一种动态窗口下改进的机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(22): 244—248.
CHEN Guang-ming, ZENG Bi, LYU Ling. An Improved Robot Path Planning under Dynamic Window[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(22): 244—248.
- [15] 李建坡, 时明, 钟鑫鑫. 自适应蒙特卡罗无线传感器网络移动节点定位算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(4): 1191—1196.
LI Jian-po, SHI Ming, ZHONG Xin-xin. A Mobile Node Localization Algorithm for Adaptive Monte Carlo Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(4): 1191—1196.