

文章编号 1004-924X(2023)23-3504-13

融合多光学传感及变积分 PID 算法的搬运机器人

李文浩^{1,2}, 谭宇飞^{1,2}, 周登科¹, 秦运柏^{1,2*}, 杨佳兴¹

(1. 广西师范大学 电子与信息工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 广西师范大学 智能机器人实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:为解决搬运机器人无法在复杂光环境下实现精准循迹等问题,提出适用于智能搬运机器人的融合多光学传感和变积分 PID 方法。将短波长激光器与多路灰度传感器相结合,实时采样循迹轨迹并应用滑动平均滤波算法预处理其采集信息,计算数据与平衡状态的偏差,再对其加权累加融合后作为变积分 PID 算法的输入量,收敛距离可缩短至 10 cm 以内。在此基础上,在搬运机器人本体增加抓取物块结构,以拓展搬运机器人作业的灵活性和适用性,采用 4 自由度机械臂、气泵和载物台组成灵活抓取结构。实验结果表明,在室内光线和室外自然光环境下,该算法可在 3 min 内实现二维码识别、稳定循迹和物块搬运等功能,且机器人的任务准确率均为 100%。变积分 PID 算法能够增强搬运机器人循迹的实时反馈,加快对循迹误差的响应能力,提高了搬运机器人循迹的稳定性和环境适应性。

关键词:光电搬运机器人;半导体激光;PID 控制算法;二维码识别

中图分类号:TP242.2;TH692.3;TN365 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233123.3504

Transport robot integrating multi channel optical sensing and variable integral pid algorithm

LI Wenhao^{1,2}, TAN Yufei^{1,2}, ZHOU Dengke¹, QIN Yunbai^{1,2*}, YANG Jiaxing¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Guangxi Normal University,
Guilin 541004, China;

2. Intelligent Robot Laboratory, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

* Corresponding author, E-mail: qinyunbai@gxnu.edu.cn

Abstract: This paper proposes a fusion of multiplexed optical sensors and variable integral PID methods for intelligent handling robots to deal with their inability to realize accurate trajectories in complex environments. First, a short-wavelength semiconductor laser sensor and multiple grayscale sensors were used to sample the trajectory in real time, and the collected data were preprocessed by applying the sliding average filtering algorithm. Then, the deviation of the data from the equilibrium state was calculated using a combined multi-optical sensing and variable integral PID control algorithm. The accumulation and fusion were weighted, which serves as the input of the variable integral PID control algorithm and reduces the convergence distance to 10 cm. Finally, to expand the applicability of the gripping structure of the object block, a four degrees-of-freedom robotic arm, extractor pump, and load table were used to form a grasping structure. The experimental results show that the algorithm can perform the functions of QR code recognition,

收稿日期:2023-07-14;修订日期:2023-08-15.

基金项目:广西科技基地与人才专项(No. AD23026226)

stable trajectory, and block grasping and handling in 3 min, in both indoor and outdoor environments. The robot has a task handling accuracy rate of 100%. The algorithm improved the stability and environmental adaptability of the trajectory of the handling robot, strengthened the real-time feedback of the robot route in the process of handling the trajectory, and accelerated the robot's response to the trajectory error, which is of great significance for automation technology.

Key words: photoelectric handling robot; semiconductor laser; PID control algorithm; QR code recognition

1 引 言

搬运机器人可以自主执行搬运任务,利用先进技术完成装载、卸载、搬运和码垛等操作,在现代工业和物流领域发挥着重要作用。随着物流技术的发展,货物搬运和物流管理越来越智能,搬运机器人在仓储作业中得到了广泛的应用^[1]。目前,KIVA等新型自动化搬运机器人已经进入仓储行业^[2]。相较于人工搬运,机器人具有高效、精准、安全及可持续等优势。自主循迹是搬运机器人实现所有功能的前提^[3],只有当机器人稳定地循迹至指定位置后才能完成抓取、搬运和放置等动作指令。因此,自主循迹的稳定性成为研究热点。

常用的机器人自主循迹导航方式可分为磁带循迹导航、视觉循迹导航和激光循迹导航等。磁带循迹导航是通过机器人上的磁传感器感应铺设在地面的磁性导轨而实现循迹。张长勇等^[4]采用磁传感器和电子罗盘组成循迹误差检测系统,实时分析各种路径的误差补偿。尹妹等^[5]设计了一种线性自抗扰控制器,减小循迹过程中外部随机干扰的影响,实现磁带自动导引小车稳定的循迹和高性能的控制。然而,磁带循迹导航需要预先在地面铺设磁性引导条或将磁钉埋于地下,需要耗费大量人力,且磁钉的成本也十分昂贵。

Theodoridou等^[6]使用RGBD相机和激光传感器,实时扫描检测周围环境,使机器人可以在所得到的地图内自主导航。Zhen等^[7]提出了基于视觉的目标跟踪,在自动驾驶汽车导航中取得了很大的成就,数据融合能更好地利用冗余传感器信息,提高自动驾驶汽车的稳定性和安全性。

Fang等^[8]重点讨论了视觉导航深度强化学习中样本效率和导航性能间的问题,并提出了深度模仿强化方法。这类视觉循迹导航的机器人需要强大的算力平台和昂贵的视觉相机,运输速率却较低。

光学传感器循迹是一种成本较低且精度较高的机器人导航方式,因此得到了广泛的研究。高婉婷等^[9]使用红外传感器实现了智能避障小车的循迹功能。宋海龙等^[10]提出的智能物流搬运机器人使用2个圆弧形爪片结构组成的机械爪实现物块的抓取功能。洪一民等^[11]提出的智能小车使用红外传感器和超声波传感器探索周围障碍物。程苡凡等^[12]提出的寻宝旅游机器人在循迹程序中使用PID闭环控制。杨利等^[13]提出在小车的前后分别安装循迹模块,并通过位置和速度的双闭环PID算法控制小车从而实现自动循迹。上述方案使用对光线敏感的红外传感器,只能在正常的室内环境运行,适应性差和稳定性差^[14]。此外,搬运机器人抓取物块时无法将物块牢牢固定,放置时会产生偏差。搬运机器人循迹使用传统的PID控制算法,可能引起超调和过冲等问题,导致机器人失控。

针对以上问题,本文提出了融合多光学传感及变积分PID算法的智能光电搬运机器人方案,实现了二维码识别、颜色识别、智能循迹、机械臂搬运和物块抓取等功能。该搬运机器人具有以下特点:融合使用8路灰度传感器和激光传感器,通过加权累加融合数据使机器人可以实时感知周围场景并应对复杂环境,减小外界光源对传感器的影响,在放置物块时使用波长更短的635 nm垂直腔面发射激光(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)传感器,能够提高放置物块

的精度;循迹模块中加入变积分增量式PID控制算法,在积分项前添加一个 $[0,1]$ 之间线性变化的参数,可以避免过饱和和积分导致机器人控制出现超调等问题,减小机器人的位置偏差,提高机器人循迹的稳定性;使用4自由度机械臂与抽气泵共同完成对物块灵巧地抓取与搬运,使用吸嘴接触物块,增大了机器人抓取时的容错率;通过OpenMV摄像头拍取照片,并通过图像二值化和透视校正算法预处理,再进行二维码识别,提高了二维码识别的正确率与高效性。该智能光电搬运机器人在不同环境下均可以在短时间内完成任务,具有极高的可行性,运输效率获得大幅提升。

2 系统总体设计

智能光电搬运机器人的系统结构框图如图1所示。该智能光电搬运机器人由机械结构、硬件电路和软件程序3部分组成。其中,机械结构包括底板、顶板、物块抓取结构等车身主体部分,同时装配有VCSEL激光器、OpenMV、4个电机和4自由度机械臂。

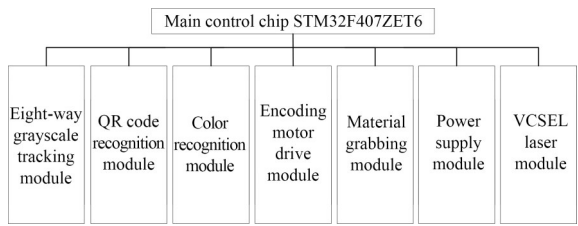


图1 智能光电搬运机器人的结构框图

Fig. 1 Framework of intelligent photoelectric handling robot

硬件电路包括以STM32F407ZET6为控制芯片的主控电路和以BNT8982TA为驱动芯片的电机驱动电路,两者通过插针组合成一个完整的电路系统。主控电路包括降压模块和多VCSEL激光器循迹模块,并预留41个外设接口;而电机驱动电路则是基于全桥原理设计的。软件程序采用变积分增量式PID算法提升机器人循迹稳定性,此外运用图像处理技术提高二维码识别的准确性。智能光电搬运机器人实物和结构如图2所示。

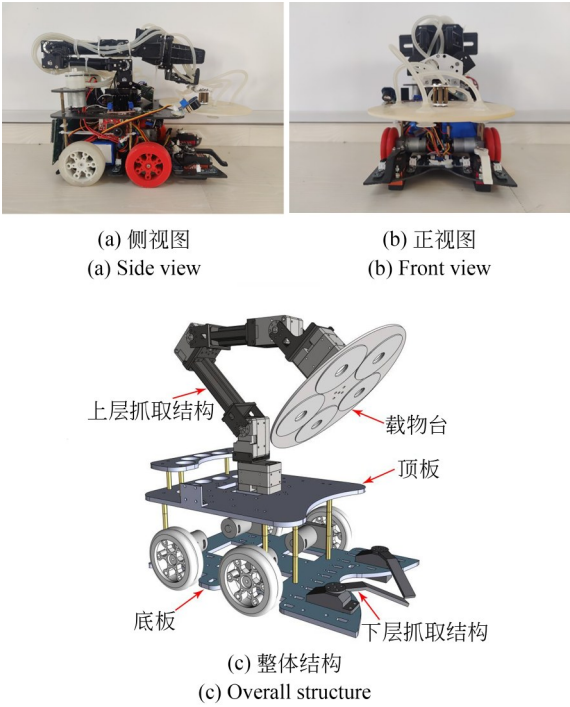


图2 智能光电搬运机器人实物图

Fig. 2 Photos of intelligent photoelectric handling robot

3 机械结构设计

3.1 底板结构设计

机器人的底板结构设计如图3所示。智能光电搬运机器人使用4个电机驱动,可以有效防止机器人急停或急转导致重心偏移而产生的侧翻,以适应各种场景和不同运动状态。

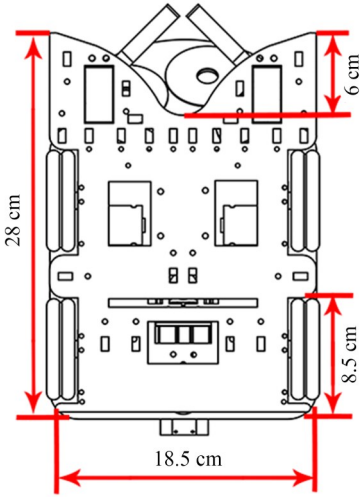


图3 底板结构

Fig. 3 Structure of bottom plate

底板尺寸为 $18.5\text{ cm} \times 28\text{ cm}$, 安装有 8 路灰度传感器、灰度传感器和激光传感器。由于机器人重心靠前会导致急停时机器人后轮着地力过小、有向前倾倒的趋势, 将 4 个电机放置在底板靠后部位。为了避免轮子刚蹭底板且易于调整底板上电机的位置和高度, 为每个轮子预留 8.5 cm 的空间。同时, 在底板前部设置一个深度为 6 cm 的“V”型凹槽, 使物块固定在凹槽处, 利于对物块的收集和抓取。在凹槽两侧的舵机上设计了抓取装置, 以稳定抓取物块。除此之外, 在凹槽后侧装配颜色识别模块, 便于在抓取物块时识别物块颜色。

3.2 顶板结构设计

顶板结构共有两层, 如图 4 所示。上层为固定抽气泵的固定支架, 包括减振垫片和减振海绵, 可以减少气泵工作时抖动对机器人运行的影响。下层使用 4 个紧固螺丝连接机械臂, 可以防止机械臂运动时与机器人顶板发生位移。侧边设计一个可调节高度和俯仰角度的支架, 用于固定 OpenMV 摄像头模块。

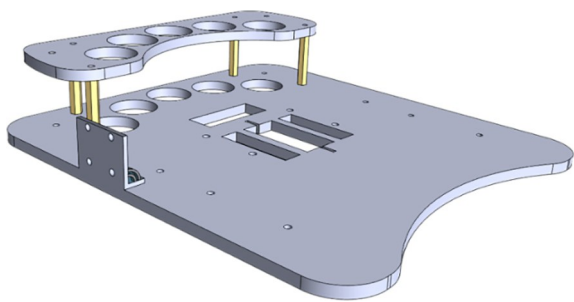


图 4 顶板结构

Fig. 4 Structure of top plate

3.3 物块抓取结构设计

物块抓取结构共分为上层机械臂搬运结构和下层舵机夹爪结构两个部分。上层机械臂抓取结构由 4 自由度机械臂、5 个高负压抽气泵和 1 个安装了抽气泵吸嘴的载物台组成, 机械臂的臂展最长可达 40 cm 。其中, 4 自由度机械臂是由 4 个 Dynamixel 舵机构成的^[15]。5 个高负压抽气泵使用脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 信号精确控制抽气泵吸力。在机械臂最前端装配一个厚度为 4 mm 的载物台, 如图 5 所示。载物台有 5 个直径为 15 mm 的开孔, 每个开孔之间的夹角为 72° , 用于安装气泵吸嘴, 在吸嘴

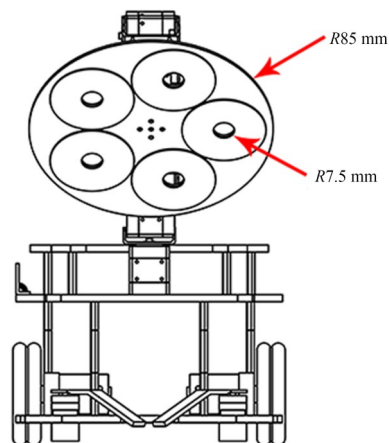


图 5 载物台结构

Fig. 5 Structure of loading platform

和载物台之间使用密封性极高的树脂胶固定, 防止漏气。气泵向载物台提供负压吸力, 最大负载为 3.5 kg 。为了使载物台更好地与物块接触, 在预留的开孔周围增加 3 mm 的凸台, 以增加机器人抓取物块时的容错率。下层舵机夹爪结构由两个扭矩为 $1.96\text{ N}\cdot\text{m}$ 的舵机组成, 每个舵机上安装一个带有一定弧度的夹取装置, 最大抓取货物的直径为 18 cm 。

4 硬件设计

4.1 循迹模块硬件设计

智能光电搬运机器人的循迹电路模块由 2 个 8 路灰度传感器、10 个单独的灰度传感器和 8 个激光传感器组成。灰度传感器是一种基于光敏二极管的光电效应原理研发的光学模拟传感元件, 可以感知光线的亮度, 并且光敏接收管在有效的检测距离内可以准确地采集反射光线的强度^[12]。然后, 传感器通过分压电路和比较电路, 将检测到的光线强度转换成模拟/数字信号。图 6 为灰度传感器原理。

灰度传感器遇到黑线时光线反射较弱, 灰度采集的数值相对较低, 遇到白线时光线反射较强, 灰度采集的数值相对较大^[16]。此外, 通过机器人系统电路模块上的模数转换器端口输入到微控制器进行处理, 使机器人对当前状态做出一定的调整^[17]。安装在机器人底部的 10 个灰度传感器起到定位标志的作用, 当灰度传感器检测出黑线时, 可以对一些路口进行判断, 也可以用在

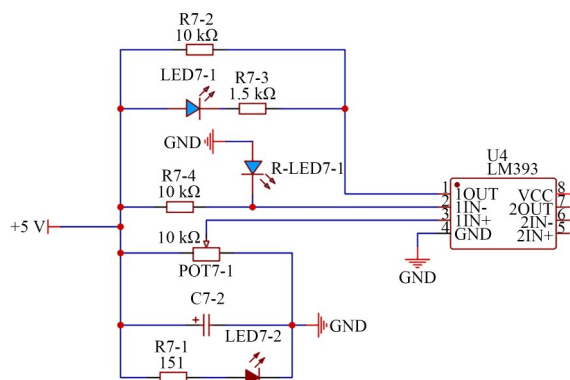


图6 灰度传感器原理

Fig. 6 Schematic diagram of grayscale sensor

机器人自身旋转时判断减速的关键定位标志。

使用内置滞回和滤波算法的8路灰度传感器,可以同时检测不同位置的光线强度,获取更精确的光线分布信息,以判断机器人在黑线上的

相对位置。同时,在8路灰度传感器外部还有外置滤光装置,可有效抵抗阳光等其他光线的干扰。

激光传感器使用波长为635 nm的VCSEL,可以照射远距离的地面,识别远处黑线的分布情况,使机器人能够提前进行路口检测并判断相对于预设路径的位置和姿态。通过激光传感器和8路灰度传感器的数据融合,智能光电搬运机器人可以更全面地感知自身位置和周围环境,并基于此做出对应的控制和循迹决策,从而实现更准确、更高效的移动。

4.2 电机驱动电路

智能光电搬运机器人的驱动电路使用4块驱动芯片BTN8982TA构成两个全桥驱动电路,分别驱动控制两侧的电机。BTN8982TA的原理如图7所示。

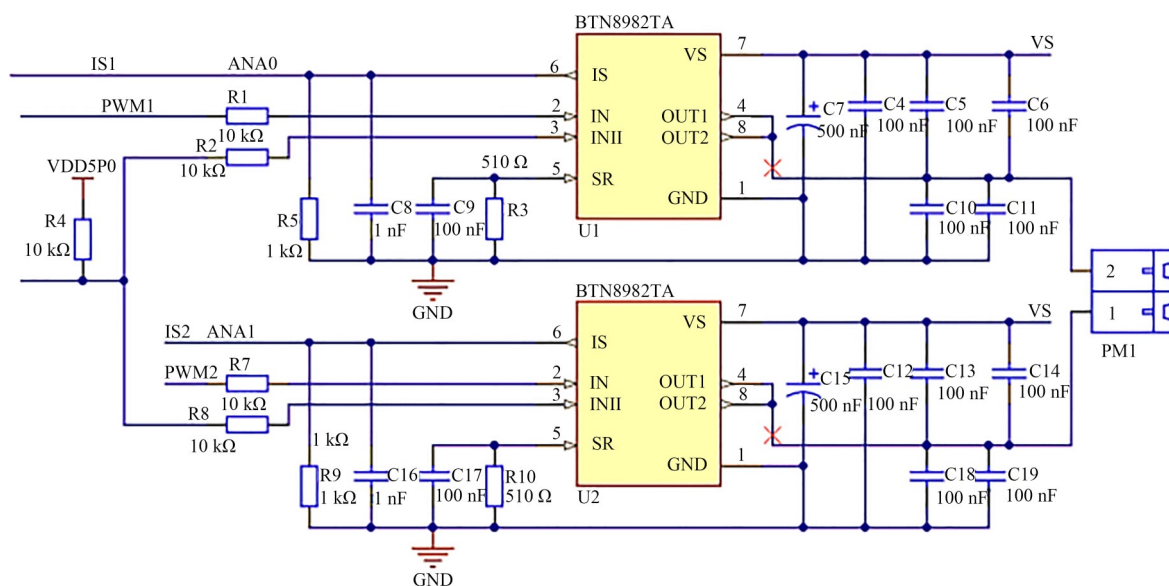


图7 BTN8982TA原理

Fig. 7 Schematic diagram of BTN8982TA

通过PWM技术得到脉宽可以调节的输出信号,改变直流电机正负端上存在的电压差,即可驱动直流电机的正转、反转和停止^[18]。电机驱动模块使用12 V电压供电,经过SCT2630ASTER降压转换器后输出5 V电压给驱动芯片BTN8982TA供电,也可以给主控电路模块上预留的外接设备供电。

4.3 电路系统硬件设计

考虑到搬运机器人的功能需求以及工作环

境,主控制系统选用STM32F407ZET6单片机,采用双面板设计,并且支持60路模数转换器输入(Analog-to-Digital Converter Input, ADC)端口和通用输入输出(General-Purpose Input/Output, GPIO)端口、16路PWM输出端口、5路通用异步收发器(Universal Asynchronous Receiver Transmitter, UART)等。将ADC端口和GPIO端口放置在单片机边缘,将主控制芯片和串行线调试下载(Serial Wire Debug, SWD)端口放置在主控板

的正面,其余放置在背面。驱动板也采用双面板设计,使用全桥原理驱动两侧的轮子,将按键和所有预留外部接口放置在驱动板背面,方便外接设备的接入。

5 软件系统设计

5.1 系统控制流程

智能光电搬运机器人的系统控制流程如图8所示。智能光电搬运机器人运行时首先使用OpenMV进行二维码识别,再通过变积分增量式PID控制算法、循迹模块和电机驱动使机器人移动到任务区域,接着使用舵机夹爪固定物块并识别颜色,然后将物块搬运至指定位置。在完成任

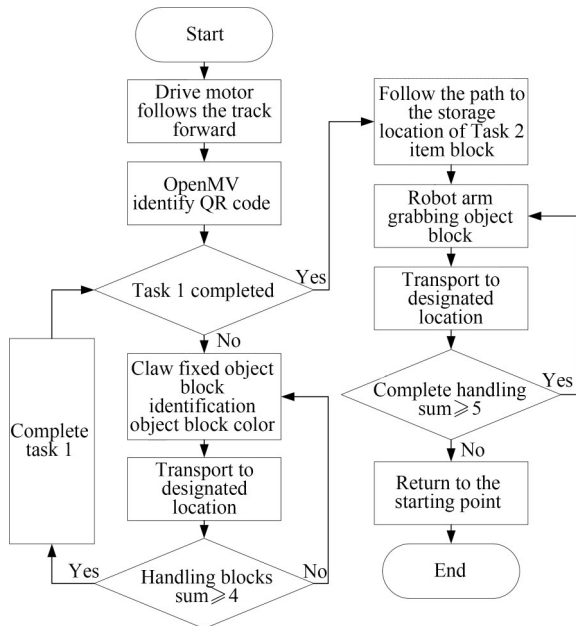


图8 智能光电搬运机器人的系统控制流程

Fig. 8 Flowchart of intelligent optoelectric handling robot

5.2 光电信号处理

智能光电搬运机器人使用多光学传感器,主控芯片通过ADC端口采集传感器数据,采集速度为800次/秒。然而,环境自然光对传感器的干扰和传感器自身局限性导致它在采集数据时可能存在误差。为了提高传感器采集数据的稳定性和可靠性,加入滑动平均滤波(Moving Aver-

age Filter,MAF)算法。其公式如下:

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{t-i} + q_{t+i}) + q_t}{2n}, \quad (1)$$

其中: Y_t 是第 t 次得到的滤波输出, q_{t-1} 是第 $t-1$ 次采集得到的数值, n 为滑动窗口内采样点个数的中值, q_t 为传感器的采集结果。 q_t 为:

$$q_t = r_t + \delta_t, \quad (2)$$

其中: δ_t 为真实数据, r_t 为噪声。将式(2)代入式(1)可以得到:

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (r_{t-i} + r_{t+i}) + r_t + \sum_{i=1}^n (\delta_{t-i} + \delta_{t+i}) + \delta_t}{2n}. \quad (3)$$

本文设计的采样点个数 $2n$ 为 10, 每采集一次新数据, 就对前 10 次采集的数据累加后求平均值, 得到当前时刻的滤波结果。MAF 算法可以滤除采集数据时的抖动和噪声, 避免机器人对周围环境的误判。

5.3 电机控制算法

由于锂电池存在长时间放电输出电压会逐渐降低的特性, 机器人进行大角度转弯时与期望位置可能存在较大偏差, 因此运用PID控制算法实时调整两侧电机转速, 提高了机器人循迹的稳定性。为了减少主控芯片的计算量, 并增强对外部扰动的抑制能力, 本文选用增量式PID控制算法。通过在机器人循迹功能模块内添加增量式PID控制算法, 可以使用闭环控制系统准确控制机器人的循迹速度^[16]。增量式PID控制算法的原理如图9所示。

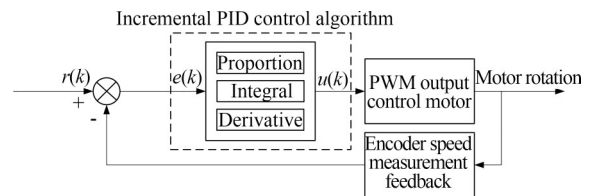


图9 增量式PID控制算法原理

Fig. 9 Schematic diagram of incremental PID control algorithm

增量式PID控制器不仅继承了传统PID控制器原理简单、易于实现、适用面广、控制参数相互独立和参数选定简单的优点, 还克服了传统PID控制器抗干扰能力差、计算繁琐和容易误差

叠加等缺点^[19]。

由图 9 可知,需要准确计算出电机速度的偏差和循迹时机器人中心与地图黑线的偏差。电机转速的偏差可通过编码电机在固定时间内采集到的脉冲数量确定,但位置偏差需要通过多光学传感器得到的数据进行加权融合后获得。融合多光学传感数据的公式如下:

$$e_n = \sum_{k=1}^{20} \beta_k \times (Y_{t,k} - E_0). \quad (4)$$

计算得到的位置偏差为 e_n ,各光学传感器采集的数据进行 MAF 处理后得到的数据分别为 $Y_{t,k}$,平衡状态时采集得到的数值为 E_0 ,各传感器获得数据后的加权系数为 β_k ,加权系数如表 1 所示。表中, $\beta_1 \sim \beta_8$ 对应 8 路灰度传感器, $\beta_9, \beta_{10}, \beta_{19}, \beta_{20}$ 对应激光传感器, $\beta_{11} \sim \beta_{18}$ 对应单个灰度传感器。通过各光学传感器采集的数据融合,根据黑线位置可以得到偏移量。机器人中心与黑线之间的距离越大,偏移量就越大。

表 1 各传感器获得数据后的加权系数

Tab. 1 Weighting coefficients for each sensor after obtaining data

编号	加权系数	编号	加权系数
β_1	2	β_{11}	5
β_2	2	β_{12}	5
β_3	2	β_{13}	3
β_4	2	β_{14}	3
β_5	2	β_{15}	5
β_6	2	β_{16}	5
β_7	2	β_{17}	1
β_8	2	β_{18}	1
β_9	3	β_{19}	10
β_{10}	3	β_{20}	10

增量式 PID 算法只是输出了 PWM 占空比的变化量,并不是直接控制 PWM 输出的绝对值,系统响应更迅速。将偏差输入增量式 PID 控制算法,并计算出由比例项、积分项和微分项组成的控制量,调整 PWM 的输出改变机器人两侧轮子的速度差,进而快速稳定地到达目标位置。增量式 PID 控制算法的公式为:

$$\begin{aligned} U(K) &= K_p e_n + K_i \sum_{k=0}^n e_n + K_d (e_n - e_{n-1}) \\ \Delta U(K) &= U(k) - U(k-1) = \\ &= K_p (e_n - e_{n-1}) + K_i e_n + K_d (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知,PID 控制算法的积分系数 K_i 是固定系数,所以积分增量在控制过程中也是不变的,积分系数过大则会产生超调甚至积分饱和,过小则无法短时间消除静态误差。然而系统偏差越大,积分作用应该减弱甚至全无;偏差越小,积分作用则应该加强^[20]。针对这些问题,这里利用变积分算法的 PID 控制思想。图 10 是变积分增量式 PID 算法和传统增量式 PID 算法的性能对比。

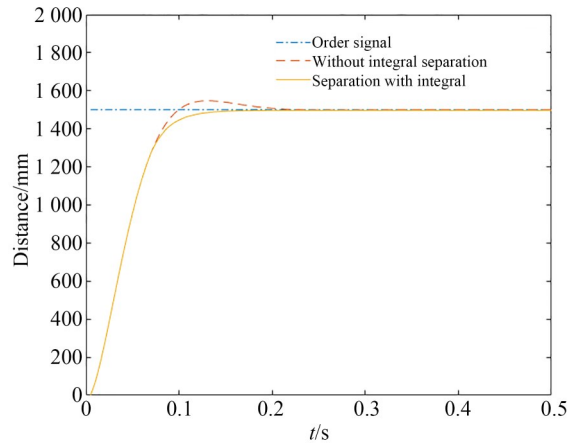


图 10 变积分 PID 算法和普通 PID 算法的对比

Fig. 10 Comparison between variable integral PID algorithm and ordinary PID algorithm

由图 10 可知,为增量式 PID 控制算法添加变积分系数,可以使增量型 PID 控制器的超调量减少、调节时间缩短,增加机器人循迹的稳定性。

变积分的 PID 积分项和变积分增量式 PID 算法的表达式分别为:

$$U_i(k) = K_i \left(\sum_{j=0}^{k-1} e_j + F(e_n) \times e_n \right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} U(k) &= K_p e_n + K_i \left(\sum_{j=0}^{n-1} e_j + F(e_n) \times e_n \right) + \\ &+ K_d (e_n - e_{n-1}), \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $F(e_n)$ 是一个线性变化的系数,它的具体表达式如下:

$$F(e_n) = \begin{cases} 1, & |e_n| \leq e_{\text{lower}} \\ \frac{e_{\text{upper}} - |e_n|}{e_{\text{upper}} - e_{\text{lower}}}, & e_{\text{lower}} < |e_n| \leq e_{\text{upper}} \\ 0, & |e_n| > e_{\text{upper}} \end{cases} \quad (8)$$

$F(e_n)$ 的取值在 $[0, 1]$ 之间。 e_n 的绝对值越大, $F(e_n)$ 越小, 反之则越大。

5.4 图像识别

针对二维码放置在距离出发点超过 20 cm, 大部分图像传感器无法识别的问题, 图像识别采用的方案为 OpenMV+500 万像素长焦镜头, 手动对焦后可以更清楚地拍摄二维码的图像。OpenMV 首先拍照并将图片进行二值化和透视

校正处理后, 在图像中寻找二维码并绘制二维码外框, 其次识别二维码并通过串口传送给机器人的主控芯片。主控芯片接收到二维码数值后进行任务 2 的搬运。

6 测试结果与分析

6.1 增量式 PID 循迹参数测试

PID 控制算法在运行中需要调节 K_p, K_i, K_d 三个系数。实验中经历多次 PID 参数调整后, 得到多组控制 PWM 输出值与时间的关系, 如图 11 所示。

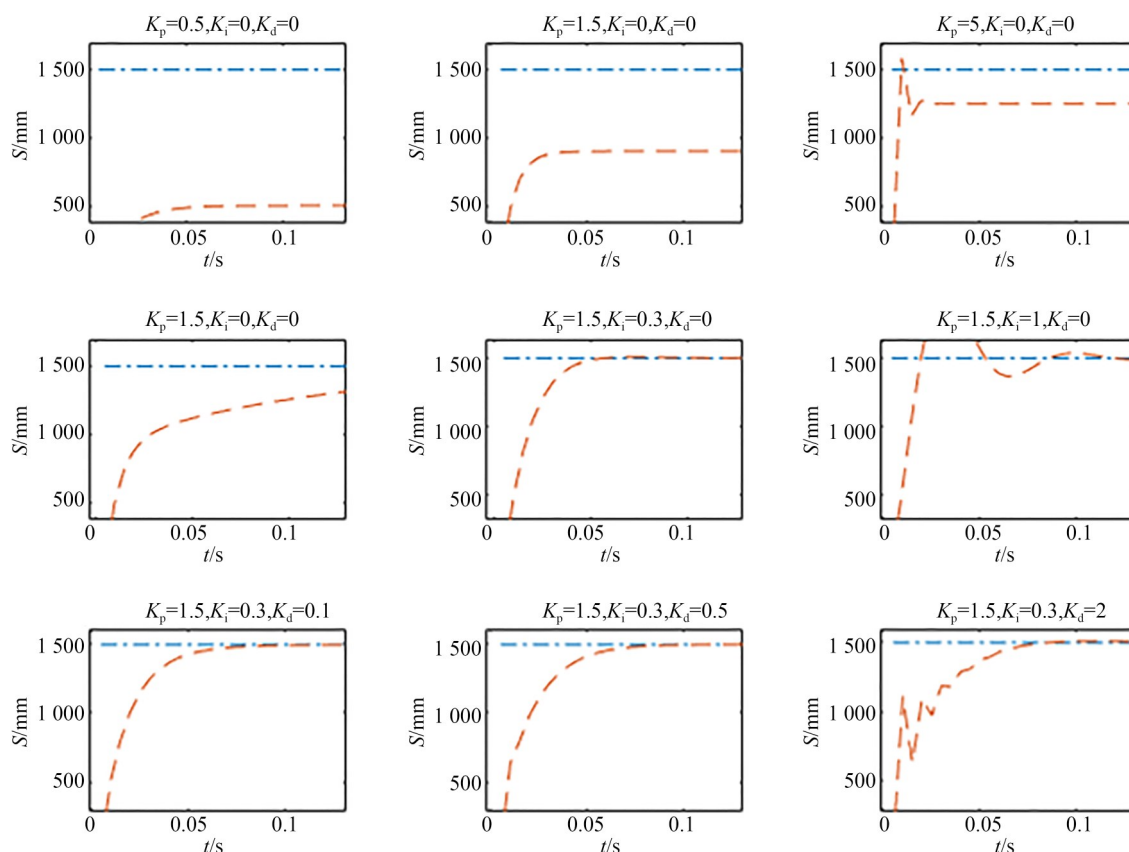


图 11 不同 PID 参数的循迹对比

Fig. 11 Comparison of trajectory with different PID parameters

当比例项较小时, 无法处于期望位置, 存在较大的静态误差; 当比例项较大时, 系统响应速度较快, 但是会出现明显的超调和振荡现象, 导致机器人最后失控。加入积分项后, 机器人明显距离期望位置更近, 但是积分项过大时振荡次数较多, 长时间才能达到稳定。微分项用于抑制机

器人循迹时发生的过冲和振荡, 但是设置不宜过大, 否则系统噪声的放大作用会增强, 机器人会出现抖动问题^[21]。经过机器人循迹多次验证后, K_p, K_i, K_d 分别设置为 1.5, 0.3, 0.5。

6.2 光电传感器测试

为了尽量还原工厂、厂房的环境, 本文设计

了两种实验环境。室内环境是模拟工厂厂房的环境,室外阳光直射环境是为了测试机器人抗干扰的性能。工厂照明多为从上而下照射的大灯,与实验室使用的室内顶灯相似。但工厂中存在不确定光源,例如焊接时的火光,窗口照射进工厂的阳光等,故实验在室外多干扰环境下进行。

光电传感器测试分别使用红外传感器、灰度传感器和激光传感器进行循迹测试,循迹路线是边长为 5 m 的正方形,线宽为 20 mm。当机器人转弯后循迹可能发生较大的超调量,甚至脱轨。3 种传感器安装在机器人底盘的相同位置,在室内正常环境和室外阳光照射环境各进行 20 次循迹,表 2 为各传感器循迹时最大超调量和脱轨次数对比。

表 2 各传感器循迹时的最大收敛距离和脱轨次数

Tab. 2 Maximum convergence distance and number of derailments for three sensors

传感器	收敛距离/cm		脱轨次数	
	室内	室外	室内	室外
红外传感器	240	410	8	15
灰度传感器	50	85	2	5
激光传感器	10	10	0	0

由表 2 可知,红外传感器对光线最敏感,环境影响大,在实验中室内环境下脱轨 8 次,室外环境下脱轨 15 次,机器人在循迹时极易发生误判。激光传感器最准确,机器人循迹时产生的超调量最小,无论室内环境或是室外环境都没有发生脱轨。

6.3 搬运机器人系统测试

软件程序使用 Keil μ Vision5 和 OpenMV IDE 软件编写。为了验证智能光电搬运机器人循迹模块中使用的融合激光传感器和变积分增量式 PID 算法的有效性,采用图 12 所示的搬运测试地图,通过自动化算法实现智能化搬运物块等任务。

智能光电搬运机器人任务 1 的流程如图 13 所示。任务 1 的流程从各功能初始化开始,然后向前循迹至指定位置停下,扫描二维码获取任务物块摆放的顺序。接着,机器人继续向前循迹移动至各个物块的存放区进行物块颜色识别,最后,舵机夹爪固定住物块并搬运至对应颜色的目

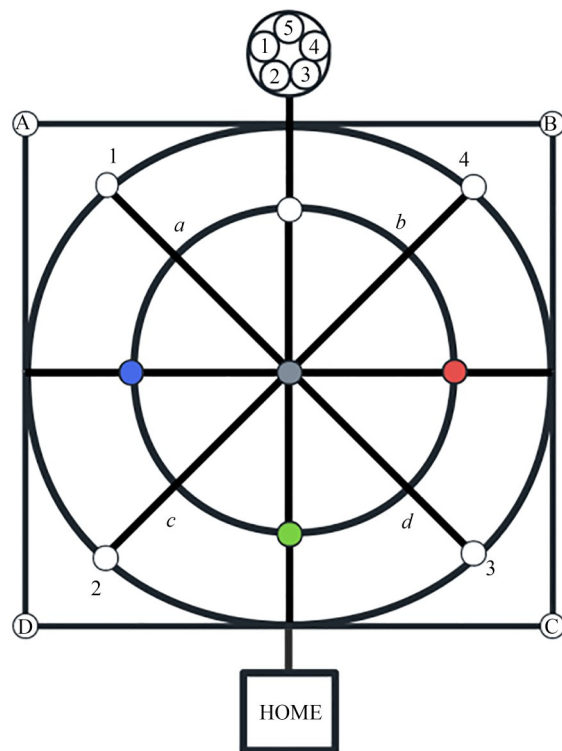


图 12 搬运测试地图

Fig. 12 Map for handling testing

标区域。

任务 1 中所有物块搬运结束后机器人回到起点,停顿后循迹至任务 2 物块存放区,使用上层机械臂抓取结构抓取 5 个物块,并按照顺序前往 A, B, C, D 目标区域放置物块。智能光电搬运机器人任务 2 的流程如图 14 所示。

针对任务 1 的任务要求,设计了两种循迹方案。方案一是机器人先到达中心位置,再按顺序前往任务点 1~4,每次抓取一个物块并迅速放至指定位置;方案二是先通过外侧的圆形黑线循迹,依次将 4 个物块抓取并放置在载物台上,最后再回到地图的中心点,多次往返将物块搬运至对应颜色的目标区域。为了选取最优方案,使用相同的物块摆放顺序进行 20 次测试,两种循迹的准确率及耗时如表 3 所示。对比后发现方案一用时更短,且循迹轨迹较为简单,机器人工作更稳定。方案二用时长并有两次脱轨,是因为循迹的总长度长并且黑线循迹情况复杂。

确定任务 1 的循迹方案,再进行任务 1 总时长的测试。先按顺序选取物块的颜色,从 5 个颜色中随机选出 4 个,并按照顺序摆放在任务点 1~4 内。共进行 20 次测试,不同颜色顺序任务 1 的耗

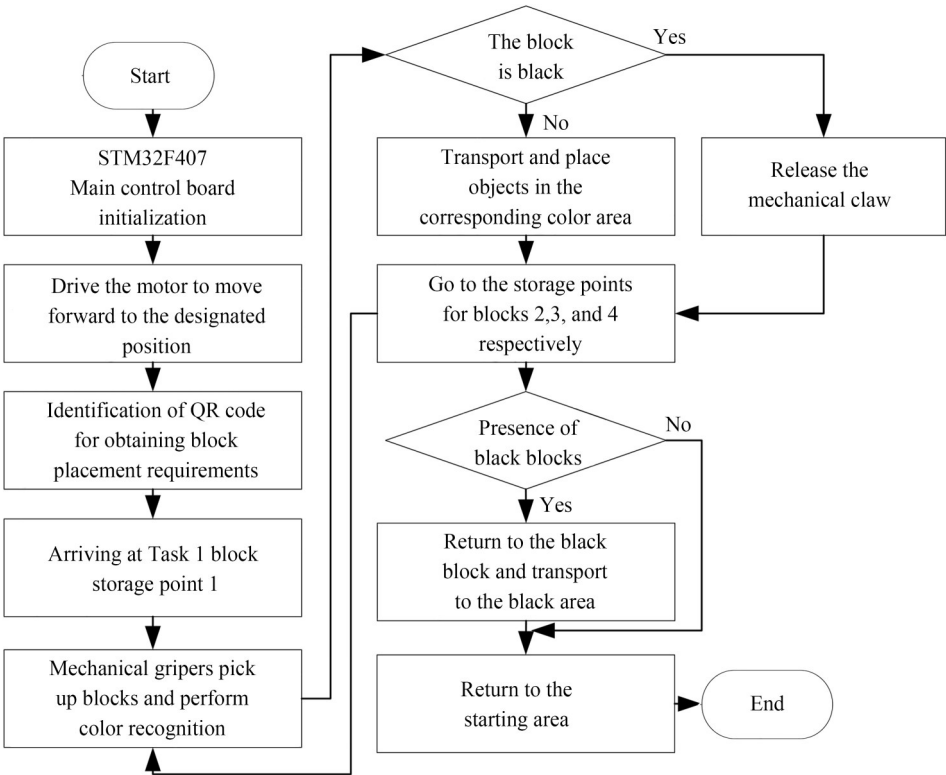


图 13 任务 1 的流程

Fig. 13 Flowchart of task 1

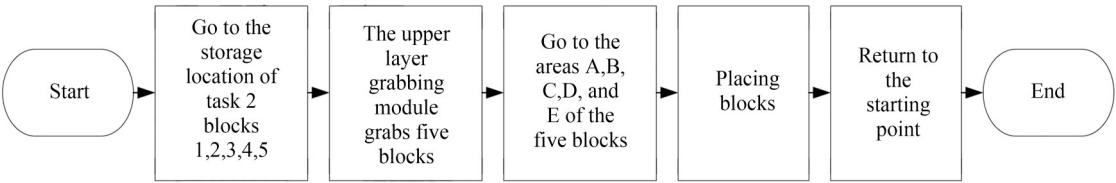


图 14 任务 2 的流程

Fig. 14 Flowchart of task 2

表 3 任务 1 的两种循迹的准确率与时长
Tab. 3 Accuracy and duration of two tracking methods in task 1

方案	物块掉落次数/ 测试总数	物块摆放位置	平均时长
一	0次/20次	全完全放入	00:01:22
二	2次/20次	3次未完全放入	00:01:39

时详见表 4。其中,最快用时 1 分 12 秒,最慢用时 1 分 45 秒,平均用时为 1 分 28 秒。智能光电搬运机器人的循迹稳定率、颜色识别和二维码识别的正确率、搬运物块的得分率均达到 100%。

针对任务 2 的要求,使用上层机械臂抓取结

表 4 不同颜色顺序任务 1 用时测试
Tab. 4 Time test for task 1 in different color sequences

物块颜色顺序				平均用时
1	2	3	4	
红	白	蓝	绿	00:01:12
蓝	红	白	绿	00:01:15
白	绿	蓝	红	00:01:22
蓝	绿	红	白	00:01:25
黑	红	白	蓝	00:01:41
红	黑	白	绿	00:01:33
蓝	绿	黑	白	00:01:37
白	蓝	红	黑	00:01:45

构对物块进行抓取。首先机器人获取到物块的摆放顺序,然后循迹至任务 2 的物块存放区停下,最后使用机械臂和气泵将物块搬运到任务 2 的目标圈内。

为了使机器人在地图上更快地运行到目标区域,设计了 3 种循迹方案。方案一是循迹经过黑直线先去放置 B 物块,再掉头放置 A 物块,完成后循迹一放置 D 物块,最后掉头放置 C 物块。方案二是按顺序 B,C,D,A 放置物块,每次先循迹一段黑直线并放置物块,然后倒车回到出发点,再向前循迹一段圆弧和一段黑直线放置下一个物块。方案三是先循迹至 B 和 C 区域间,然后循迹一段黑直线放置 C 物块,再掉头放置 B 物块,完成后倒车至出发点,再向前循迹一个半圆并放置物块 A 和 D。为了选取最优方案,使用同样的物块摆放顺序进行 20 次测试,3 种循迹方案的准确率与时长对比如表 5 所示。

表 5 任务 2 的三种循迹的准确率与时长
Tab. 5 Accuracy and duration of three tracking methods in task 2

方案	物块掉落次数/ 测试总数	物块摆放位置	平均时长
一	0 次/20 次	5 次未完全放入	00:01:35
二	1 次/20 次	1 次未完全放入	00:01:30
三	0 次/20 次	全部完全放入	00:01:21

对比后发现方案三用时最短,且循迹轨迹路程短,可以有效减少机器人的摆动,避免物块被甩出等问题的发生。方案一用时最长且有 5 次未获得满分,是因为总路线长并且掉头后循迹距离短,导致物块部分没有进入目标区域。方案二用时比方案三长,同时有 1 次物块掉落和 1 次未将物块完全放进目标区域,是因为在圆弧处加速导致车身摆动幅度大,物块掉落载物台。

确定了任务 1 和任务 2 的方案后,进行机器人测试,测试过程如图 15 所示,测试结果如表 6 所示。经过 10 次完整任务测试,智能光电机器人搬运的所有物块都能完全放入目标位置内,在起点处识别二维码的准确率达到 100%,每次对物

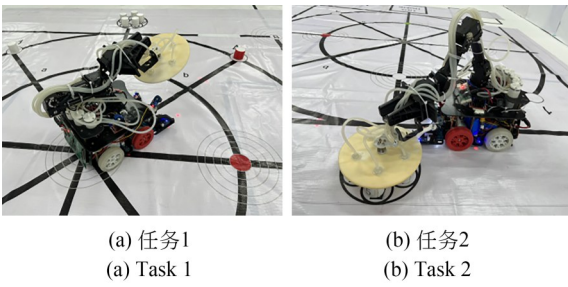


图 15 智能光电搬运机器人测试
Fig. 15 Test of intelligent photoelectric handling robot

表 6 各项目测试数据
Tab. 6 Test data for each project

任 务	测试 次数	成功 次数	准确率/满 分率
搬运后放置物块	10	10	100%
二维码识别	10	10	100%
颜色识别	10	10	100%
机械臂抓取物块	10	10	100%
机器人全程循迹	10	10	100%

块颜色识别的准确率也达到 100%,机械臂在 10 次测试中抓取物块的准确率也达到 100%。此外,且机器人全程循迹稳定性良好,未出现脱轨、超调和振荡的现象。

7 结 论

本文提出了融合多路光学传感器和变积分 PID 算法的智能光电搬运机器人,解决了搬运机器人在复杂光环境下无法稳定运行且搬运物块放置时误差大等问题。通过融合使用漫反射激光传感器和 8 路灰度传感器,增强了机器人对环境的感知。加权累加融合各传感器采集的数据偏差后,输入变积分增量式 PID 控制算法,使智能光电搬运机器人可以迅速地响应误差并在短时间内回到稳定循迹状态,将收敛距离缩短至 10 cm 以内。此外,使用 4 自由度机械臂和抽气泵可以轻松抓取物块。经过 20 次实验测试,无论室内还是室外,本文提出的智能光电搬运机器人都可以在 3 min 内完成所有任务,更稳定、更精准、更快速地将所有物块完全搬运至目标区域内。

参考文献:

- [1] ZHAO Y. Dynamic path planning analysis of warehouse handling robot[J]. *Journal of Sensors*, 2022, 2022: 1-7.
- [2] WU Y Z, GE D Y. Key technologies of warehousing robot for intelligent logistics[C]. *Proceedings of The First International Symposium on Management and Social Sciences (ISMSS 2019)*. April 13-14, 2019. Wuhan, China. Paris, France: Atlantis Press, 2019: 79-82.
- [3] ZHANG Z Y, ZHAO Z P. A multiple mobile robots path planning algorithm based on A-star and dijkstra algorithm[J]. *International Journal of Smart Home*, 2014, 8(3): 75-86.
- [4] 张长勇,王兴财,步亚,等. 移动机器人搬运物料目标定位优化仿真[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(2): 257-261.
ZHANG CH Y, WANG X C, BU Y, *et al.* Optimization of mobile robot target localization for material handling [J]. *Computer Simulation*, 2018, 35(2): 257-261. (in Chinese)
- [5] 尹姝,周海海,仇翔. 磁带导引AGV的自抗扰循迹控制方法[J]. *高技术通讯*, 2018, 28(6): 547-552.
YIN SH, ZHOU H H, QIU X. An ADRC approach to trajectory tracking control of tape guided AGV[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2018, 28(6): 547-552. (in Chinese)
- [6] THEODORIDOU C, ANTONOPOULOS D, KARGAKOS A, *et al.* Robot navigation in human populated unknown environments based on visual-laser sensor fusion[C]. *Proceedings of the 15th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. 29 June 2022, Corfu, Greece. New York: ACM, 2022: 336-342.
- [7] JIA Z, BALASURIYA A, CHALLA S. Autonomous vehicles navigation with visual target tracking: technical approaches[J]. *Algorithms*, 2008, 1(2): 153-182.
- [8] FANG Q, XU X, WANG X T, *et al.* Target-driven visual navigation in indoor scenes using reinforcement learning and imitation learning [J]. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2022, 7(2): 167-176.
- [9] 高婉婷,曳永芳. 基于STM32智能小车避障系统的设计[J]. *物联网技术*, 2023, 13(2):131-135.
- GAO W T, YE Y. Design of an STM32 intelligent car obstacle avoidance system [J]. *Internet of Things Technologies*, 2023, 13(2):131-135. (in Chinese)
- [10] 宋海龙,徐庆华,丁芃,等. 智能物流搬运机器人的设计[J]. *湖北理工学院学报*, 2023, 39(2): 7-10, 53.
SONG H L, XU Q H, DING P, *et al.* Design of intelligent logistics conveying robot[J]. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2023, 39(2): 7-10, 53. (in Chinese)
- [11] 洪一民,钱庆丰,章志飞. 基于STM32的智能小车循迹避障测距的设计[J]. *物联网技术*, 2022, 12(1):12-13,17.
HONG Y M, QIAN Q F, ZHANG ZH F. Design of intelligent vehicle tracking and obstacle avoidance distance measurement based on STM32 [J]. *Internet of Things Technologies*, 2022, 12(1):12-13,17. (in Chinese)
- [12] 程苾凡,刘文飞,白焕鑫. 基于STM32的寻宝旅游机器人小车设计[J]. *科技创新与应用*, 2022(22):40-43.
CHENG Y F, LIU W F, BAI H X. Design of a treasure hunting tourism robot car based on STM32 [J]. *Technology Innovation and Application*, 2022(22):40-43. (in Chinese)
- [13] 杨利,杨述,陈柳松. 基于循迹传感器和PID算法的AGV小车行进系统[J]. *电子设计工程*, 2019, 27(13): 148-152.
YANG L, YANG SH, CHEN L S. AGV travel system based on guiding-sensor and PID algorithm [J]. *Electronic Design Engineering*, 2019, 27(13): 148-152. (in Chinese)
- [14] 肖岚,袁银麟,翁建文,等. 基于振镜的准直光源功率稳定控制器[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(24): 3189-3197.
XIAO L, YUAN Y L, WENG J W, *et al.* Power stability controller for collimating-light source based on scanlab[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(24): 3189-3197. (in Chinese)
- [15] 邹离江. 人形机器人的硬件系统设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
ZOU L J. *Hardware System Design of Humanoid Robots* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [16] 邓语馨,陈洪芳,张爽,等. 智能物流的轮式循迹机器人系统设计[J]. *工具技术*, 2022, 56(6): 57-60.

- DENG Y X, CHEN H F, ZHANG SH, *et al.* Design of wheeled tracking robot system for intelligent logistics [J]. *Tool Engineering*, 2022, 56 (6):57-60. (in Chinese)
- [17] 范洪元, 覃美烘, 黄文妹. 基于模块化控制的多功能智能搬运小车的设计[J]. *自动化与仪表*, 2018, 33(11): 47-51.
- FAN Q Y, QIN X H, HUANG W M. Design of multi-functional intelligent porter based on modular control[J]. *Automation & Instrumentation*, 2018, 33(11): 47-51. (in Chinese)
- [18] 黄静月, 常博学, 王日霞. 探索电子电路实验项目化: 智能寻迹小车的设计[J]. *科技与创新*, 2023(10):14-16.
- HUANG J Y, CHANG B X, WANG R. Exploring project-based electronic circuit experiments-Design of intelligent tracking cars [J]. *Automation & Instrumentation*, 2023(10):14-16. (in Chinese)
- [19] 吴辉, 司晨, 姜湖海, 等. 光电跟踪平台的观测自适应控制器[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1311-1320.
- WU H, SI CH, JIANG H H, *et al.* Observational adaptive controller for photoelectric tracking platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29 (6) : 1311-1320. (in Chinese)
- [20] 孙建康, 王帅, 曹斯萌, 等. 基于模糊PID控制的智能循迹小车设计[J]. *现代制造技术与装备*, 2021, 57(12): 202-205.
- SUN J K, WANG SH, CAO S M, *et al.* Design of intelligent tracking vehicle based on fuzzy PID control [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2021, 57(12): 202-205. (in Chinese)
- [21] 王跃. 基于STM32的自平衡小车PID控制算法研究[J]. *电脑与电信*, 2022(9): 63-68.
- WANG Y. Research on PID control algorithm for self-balancing vehicle based on STM32[J]. *Computer & Telecommunication*, 2022 (9) : 63-68. (in Chinese)

作者简介:



李文浩(2000—),男,浙江杭州人,主要研究方向为嵌入式系统及自动控制。E-mail: liwenhao@stu. gxnu. edu. cn

通讯作者:



秦运柏(1982—),男,桂林全州人,讲师,2008年、2011年于吉林大学分别获得学士和硕士学位,现为广西师范大学电子与信息工程学院机器人负责人,主要从事物联网和智能机器人的研究。E-mail: qinyunbai@gxnu. edu. cn