

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.02.004

复杂竞赛任务中的自动分拣搬运机器人系统设计

金琦淳^{1,2}, 任俊², 袁明新², 王琪², 张金铮²

(1. 无锡城市职业技术学院 物联网工程学院, 江苏 无锡 214153;
2. 江苏科技大学 机电与动力工程学院, 江苏 苏州 215600)

摘要:为了实现仓库中多重目标的复杂搬运及堆垛任务,设计了一款光电分拣搬运机器人。该分拣搬运机器人以STM32F103C8T6单片机为主控芯片,采用灰度传感器 SEN1595 识别地面标识,通过颜色传感器 GY-33 识别物料颜色;机械臂与末端夹取机构利用 PDI-6221MG 舵机驱动五自由度小型机械臂,在保持末端处于垂直状态下,平稳抓取物料并存放至搬运车腹部的中心转盘内;仓储分拣机构通过 PDI-6225MG-300 舵机驱动中心转盘转动至5个档位;采用 LV8731 细分器控制步进电机 MG42S1,驱动车体行进至目标堆垛区域;通过机械臂夹取转盘内的物料,结合堆垛辅助机构完成堆垛任务。在搬运工程赛项实验平台任务中,系统测试成功率达96%,满足使用要求。通过该分拣搬运系统可提高分拣运输自动化、智能化程度,改善物流仓储工作中人工依赖性较高的现状。

关键词:分拣搬运机器人;STM32F103C8T6 单片机;灰度识别;颜色识别;五自由度机械臂

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2019)02-0017-08

Design of Automatic Sorting and Handling Robot System in Complex Competition Tasks

JIN Qichun^{1,2}, REN Jun², YUAN Mingxin², WANG Qi², ZHANG Jinzheng²

(1. Department of Electronic & Information Engineering, Wuxi City College of Vocational Technology, Wuxi, Jiangsu 214153, China;
2. School of Mechatronic and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215600, China)

Abstract: A photoelectric robotic system was designed to realize the complex handling and stacking tasks of multi-objects in warehouse. The single-chip STM32 MCU was adopted as the main control chip in this robotic system. The grayscale sensor SEN1595 was used to identify the ground mark and the color sensor GY-33 was used to recognize the material color. The robot arm and the end gripping mechanism based on a small arm of five degree of freedom was servo-driven by the PDI-6221MG. While the end was kept in a vertical state, the material was grasped smoothly and stored into the center turntable which is inside the carrier. The sorter center turntable was servo-driven by PDI-6225MG-300 rotating to five different gears. The stepper motor MG42S1 was controlled by the interpolator LV8731 to drive the vehicle body to the target stacking area. The material in the turntable was picked up by the mechanical arm and the stacking task was completed by stacking auxiliary machine. In a test task of goods handling, the success rate of the system test reached 96%, which meets the requirements of the use. The automation and intelligent degree of the sorting and transportation were improved through the designed robotic system, the status of high manual dependence in logistics and warehousing is improved as well.

Keywords: sorting and handling robot; STM32 MCU; grayscale recognition; color recognition; five-DOF robotic arm

在中小型中转仓库、流通加工仓库和特种仓库等运输任务集中、繁重且工作目标复杂的仓储物流过程中,对货物的挑选、整理、分装和运输工作直接关系到

上下游企业的物资活动效率,是加快原材料区、生产加工区和供货物流区之间以及内部流动速度的关键要素,对提高企业个体劳动生产率具有重要作用。而此

收稿日期:2018-09-24;修回日期:2019-01-08

基金项目:2017年教育部产学研合作协同育人项目(201701077003)。

第一作者简介:金琦淳(1988),男,江苏无锡人,硕士,讲师,主要从事机电系统检测与控制研究。E-mail:694146000@qq.com

类工作需要大量人员的长时间重复性劳作,导致成本急剧上升,因此,一种适用于复杂目标下用以替代人工分拣运输的搬运机器人的研制就显得尤为必要。其中,光电分拣搬运小车作为一种轮式分拣搬运机器人样机,可模拟并优化仓库中多重目标的复杂搬运及堆垛任务^[1-2]。分拣搬运机器人能安装不同的末端执行件以完成各种不同形状和状态的工件搬运工作;能广泛应用于机床上、下料,冲压机自动化生产线,自动装配流水线及仓库码垛等场景中的自动搬运,大大减轻了人类繁重的体力劳动,具有广阔的市场前景^[3-6]。

因此,课题组设计了一款能够适用于仓库中多重目标的复杂搬运及堆垛任务(以中国工程机器人大赛暨国际公开赛搬运工程赛项为模拟案例)的光电分拣搬运小车,赛项平台如图1所示。该分拣搬运系统使得搬运机器人分拣运输自动化和智能化程度得到进一步提高,同时改善了一般物流仓储工作中,人工辅助依赖性较高的现状。

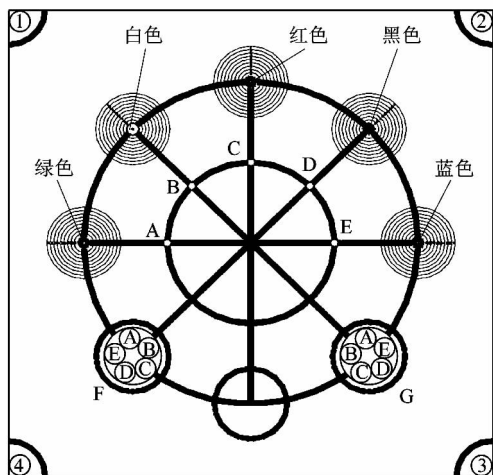


图1 中国工程机器人大赛搬运工程赛项平台

Figure 1 Transportation engineering platform of China engineering robot competition

1 功能需求分析与总体方案设计

为了模拟仓库中多重目标的复杂搬运及堆垛任务场景,以中国工程机器人大赛暨国际公开赛搬运工程赛项任务为例,设计了一种轮式移动光电分拣搬运机器人。该种机器人要求整体结构的垂直投影区域小于 $200\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ (若存在伸展结构,按最大幅度展开状况计算)。光电分拣搬运机器人需要在给定的实验平台下(如图1所示),从下方倒T字形固定起点出发,沿着一定路径,将颜色不同但形状相同的物料分类搬运到指定目标区域。物料模型为外径 40 mm ,长度 40 mm ,壁厚 $1\sim 2\text{ mm}$ 的PVC管。

整个搬运任务一共需搬运颜色不同的5种物料13个,比赛开始前,在黑箱中放置5个颜色不同的物料,参赛选手依次从黑箱中抽出5个物料,裁判记录抽到的颜色顺序,该颜色顺序即为赛项平台中的A,B,C,D和E处(F圈和G圈内)所放置物料的颜色顺序。

比赛分为2个环节,第1环节为将内圈A,C和E共3处的3个物料(内圈B和D处不放物料)搬运至外圈目的地的靶心位置;第2环节为将外圈F和G的2处共10个物料搬运至外圈目的地的靶心位置。完成物料分拣搬运后,最终回到出发点。

记分规则:机器人完成搬运任务后,或者参赛选手进行人为干预或主动叫停后,比赛结束。此时,每个物料的最外侧边缘所处的靶环环数即为该物料的得分,除13个物料的得分以外,若机器人最终返回出发点,加10分。比赛排名首先按照机器人获得的总分排序,总分相同的机器人按照时间快慢排序。

针对上述需求,设计了一种光电分拣搬运机器人机械结构总体方案,如图2所示。方案包括三自由度机械臂、二自由度夹取机构、框格式仓储分拣机构、集中收集机构和堆垛辅助机构等部件。

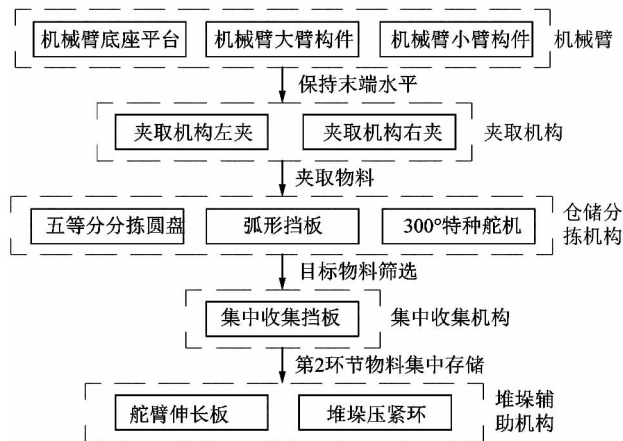


图2 机械结构总体方案

Figure 2 Overall scheme of mechanical structure

根据需求设计了轮式分拣搬运机器人控制系统总体方案,如图3所示。该搬运控制系统基本配置:直流电源降压模块、步进电机及其驱动模块、光电自主导航模块、多组舵机驱动模块和颜色传感物料信息检测模块。该自动分拣搬运机器人以STM32F103C8T6作为主控器,由稳压器LM2596T和ASM1117将3S锂电池电压二级降压供电,车体由2个MG42S1步进电机驱动,根据6只灰度传感器SEN1595传回的信号,计算方向并规划最短路径;以颜色传感器GY-33识别物料

颜色,获取物料类别信息。通过五自由度小型机械臂动力舵机控制末端水平,以保持物料处于垂直状态时可平稳抓取并存放至搬运车腹部的中心转盘内。机械臂臂部转动机构由3只PDI-6221MG舵机驱动;端部抓取执行件由2只MG90S舵机驱动;中心转盘共有5种扇形储料框格,由PDI-6225MG-300舵机驱动其转动至5种框格位置;车体前侧的堆垛辅助机构和集中收集机构各由1只ES08A II型舵机驱动。

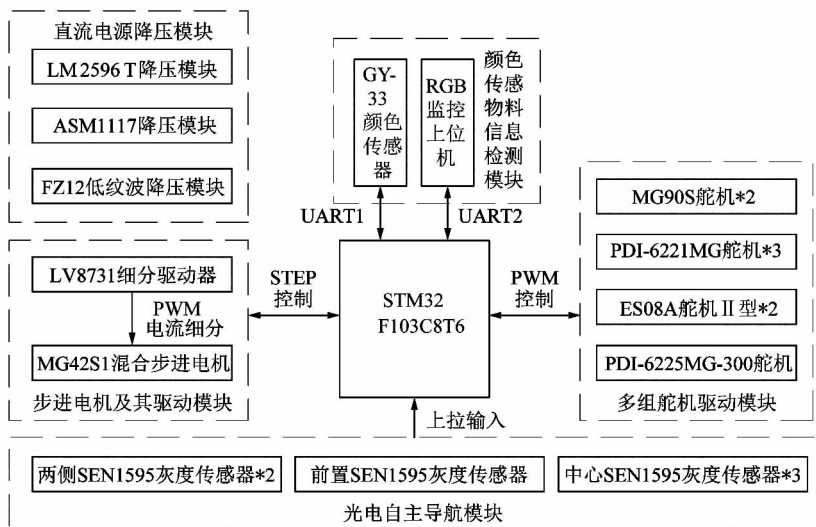
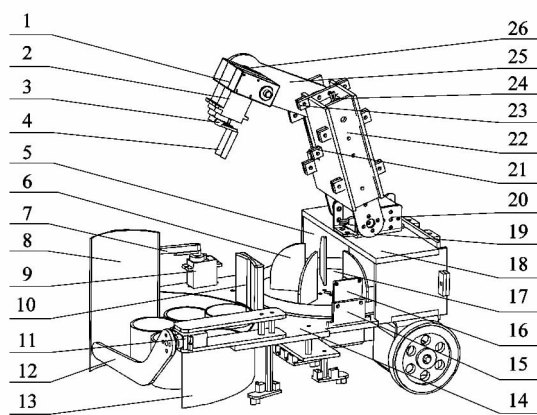


图3 控制系统总体方案

Figure 3 Overall scheme of control system



1—小臂尖舵机;2—夹取舵机;3—单向舵臂 a;4—铜柱;5—右侧板;6—分拣盘挡板;7—延长臂;8—压紧半环;9—右臂舵机;10—堆垛挡块;11—左臂舵机;12—弯刀挡板;13—收集环;14—底板;15—颜色传感器支架;16—颜色传感器;17—分拣圆盘;18—上盖板;19—短 U 型支架;20—多功能支架;21—锁紧板 a;22—大臂上盖板;23—舵机卡板;24—大臂尖舵机;25—小臂;26—舵盘。

图4 机器人总体结构正面

Figure 4 Front of overall structure of robotic system

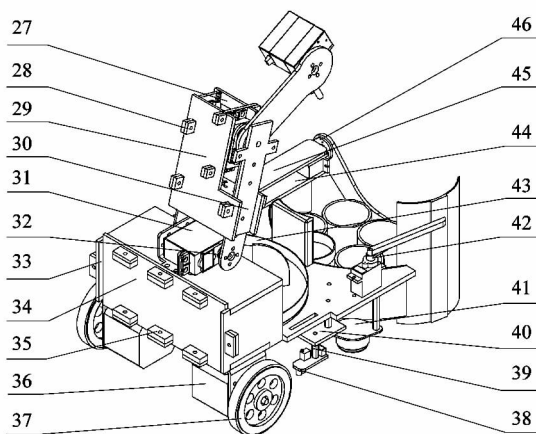
2 自动分拣搬运机器人结构设计

2.1 总体结构设计

光电分拣搬运机器人总体结构如图4~5所示,可分为6个组成模块:三自由度机械臂、二自由度夹取机构、框格式仓储分级按机构、堆垛辅助机构、集中收集机构及车体底板。

2.2 车体底盘结构设计

小车底盘结构如图6所示,由底板组件、驱动轮组件、牛眼轮组件、灰度支架组件构成,具有承载其它功能模组以及驱动整车移动的功能。底板前端呈半圆弧缺口,与一块同弧度的弧形挡板(收集环13)粘附连接,该弧形区域与圆柱形物料外轮廓相切,与压紧半环8和弯刀挡板12等配合收集物料;底板中心有 $\varnothing 20$ mm的圆孔,用于安装舵机;后段两侧为驱动轮组件,设有步进电机,通过 L 型铝合金支架固连在底板上,铝合金承重轮通过紧定螺钉与步进电机输出轴固连,为整车移动提供移动动力;底板右前侧为牛眼轮组件,设有40 mm铜柱2个和万向牛眼轮1个作支撑点;底盘中心位置处安装了灰度支架组件,灰



27—大臂下盖板;28—锁紧板 b;29—大臂上盖板;30—大臂右盖板;31—大臂舵机;32—舵盘;33—左侧板;34—后盖板;35—锁紧板 c;36—步进电机;37—承重轮;38—灰度传感器;39—六角铜柱;40—灰度支架;41—牛眼轮;42—单向舵臂 b;43—分拣盘挡环;44—延伸下板;45—延伸上板;46—舵盘。

图5 机器人总体结构背面

Figure 5 Back of overall structure of robotic system

度承载板通过2个10 mm铜柱固连在底板上,承载板下方通过5个28 mm铜柱固定5个灰度传感器。在该底盘结构中,底板材料为5 mm黑色亚克力板,灰度承载板材料为3 mm透明亚克力板,弧形挡板材料为硬质卡纸。

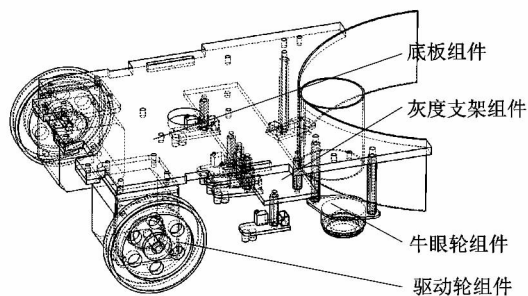


图6 车体底盘结构图

Figure 6 Car body chassis structure diagram

2.3 框格式仓储分拣机构设计

框格式仓储分拣机构如图7所示,由分拣盘组件、舵机组件、传感器组件构成,具有承载多个物料以及识别调整档位的功能。分拣盘组件设有 $\varnothing 140$ mm的开槽圆盘1块,插在圆盘槽中5片扇形挡板以及分拣盘挡环;舵机组件位于分拣盘下方,设有PDI-6225MG-300舵机1个,与1片开槽垫板固连,通过2片中空垫板调节至合适高度;传感器组件设有颜色传感器,与传感器支架固连。在该运动机构中,挡环材料为黑色弹性海绵,除此以外其余所有零件材料均为3 mm透明亚克力板,通过激光切割雕刻机加工制作。

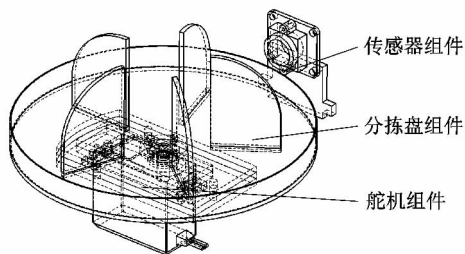


图7 框格式仓储分拣机构

Figure 7 Box format warehouse sorting mechanism

2.4 三自由度机械臂及夹取机构设计

三自由度机械臂如图8所示,由底座组件、大臂组件和小臂组件构成。该机构可在一定范围内水平状态下移动末端执行件,即在地面堆垛区上方位置与分拣盘上方位置之间往返移动。底座组件位于整车后端平台上,设有上盖板,上盖板上方通过4个螺栓固连多功能支架,多功能支架内部安装舵机;大臂组件设有长、

短U型支架各1个,与底座固连,大臂内部设有1个舵机,通过2片上下盖板和2片侧盖板包裹,由10个锁紧压板固定住;小臂组件内部设有1个舵机,舵机与1块小臂板固连。在该运动机构中,除U型支架材料为铝合金外,除此以外其余所有零件材料均为3 mm透明亚克力板,通过激光切割雕刻机加工制做。

二自由度夹取机构如图8末端所示,由左爪夹组件和右爪夹组件构成,用于夹取分拣盘内的物料或者地面上的内径为40 mm环形物料。左爪夹组件固连于小臂末端的舵机下方,设有MG90S舵机1个,输出轴通过花键与单向舵臂固连,舵臂末端装有30 mm滚花铜柱,外侧粘附弹性海绵1片,用于提供在夹取物料时的预紧力,避免物料滑落;右爪夹组件结构与左爪夹类似,不再赘述。在该运动机构中,单向舵臂材料为铝合金。

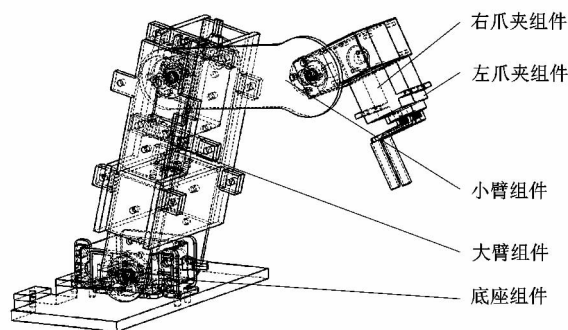


图8 机械臂与末端夹取机构

Figure 8 Robot arm and end clamping mechanism

2.6 堆垛辅助与集中收集机构设计

堆垛辅助机构如图9所示,由左臂组件、右臂组件和堆垛挡块等构成。当小车灰度传感器检测到达目标位置后,该机构右臂压紧半环8绕舵机轴心逆时针旋转,握住已放置的物料,然后机械臂在已放置完成的物料上方再堆叠放置下一个物料。右臂组件位于车体右前端,设有ES08A II舵机1个,其输出轴通过花键与一字型舵盘固连,通过延长臂扩展压紧半环的作用区域,使压紧半环结构在堆垛时可以准确压紧并对齐物料。

集中收集机构如图9前端所示,由灰度组件、右臂组件构成,主要用于F区、G区物料的收集工作。工作时可将5个物料同时锁入弧形挡板内,然后拖动其运动至合适位置后,机械臂下降,依次将5个物料抓取投放入分拣盘内。灰度组件位于车体左前端下方,设有28 mm铜柱1根,与底板固连,下方安装灰度传感器;左臂组件位于车体左前端上方,设有2片延伸板用来固定ES08A II舵机,舵机输出轴与十字形舵盘固连,

舵盘上安装弯刀型挡板,用于同时收集 5 个物料。

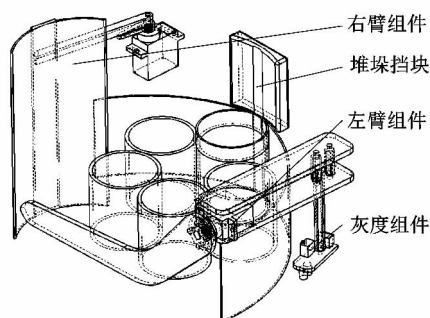


图9 堆垛辅助机构与集中收集机构

Figure 9 Stacking auxiliaries and centralized collection agencies

3 控制系统设计

3.1 总体功能设计

该自动分拣搬运机器人采用如图 10 所示的控制功能实现方案。以 STM32F103C8T6 作为主控器,由稳压器 LM2596T 和 ASM111 将 3S 锂电池电压二级降压供电;车体由 2 个 MG42S1 步进电机驱动,根据 6 只分散分布的灰度传感器 SEN1595 的传回信号,计算方向并规划最短路径;以颜色传感器 GY-33 识别物料颜色,获取物料类别信息^[7-10]。通过五自由度小型机械臂动力舵机,控制末端水平,以保持物料处于垂直状态时,机械臂可平稳抓取并存放至搬运车腹部的框格式仓储分拣机构内。机械臂臂部转动机构由 3 只 PDI-6221MG 舵机驱动;端部抓取执行件由 2 只 MG90S 舵机驱动;上述中心转盘共有 5 种扇形储料框格,由 PDI-6225MG-300 舵机驱动其转动至 5 种框格位置;由 2 只 ES08A II 型舵机分别驱动车体前侧的堆垛辅助机构和集中收集机构。

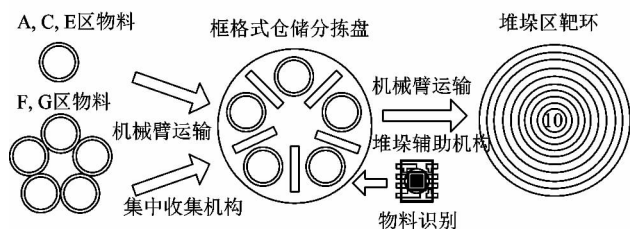


图10 分拣搬运系统工作流程

Figure 10 Sorting and handling system workflow

3.2 主控器资源分配

光电分拣搬运机器人控制系统硬件包括单片机最小系统、电源监测与控制接口、步进电机驱动控制接口、舵机组运动控制接口、灰度传感器数据接口、颜色传感器串口通信接口和在线调试系统数据串口通信接

口。根据 STM32F103C8T6 引脚功能分布情况,本设计为各个外围模块合理分配了 STM32F103C8T6 相应功能引脚,减小了外围模块接线复杂性,同时,最大化地降低了控制程序的复杂程度。

3.3 电源监测与控制

系统所需电源包括 12.0、6.0、5.0 和 3.3 V 4 种电压。其中,12.0 V 电源由 3S 航模锂电池直接提供,用于 LV8731 细分器的 VM 端电源;利用如图 11 所示的 LM2596T 降压型开关稳压芯片及 4 个滤波电容,将 3S 航模锂电池的 12.0 V 转换为 5.0 V 输出,供灰度传感器和颜色传感器使用,VIN 端通过 PA6 的 A/D 转换功能测量电源电压,监测电池电量。利用如图 12 所示的 ASM1117 线性降压稳压芯片和 4 个滤波电容,将 5.0 V 电压转换为 3.3 V 输出,用于给 STM32F103C8T6 主控器提供电源。

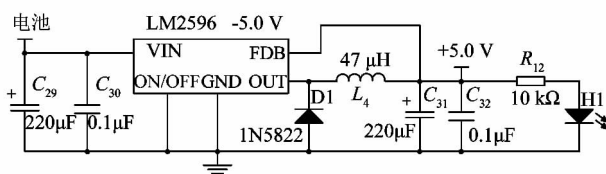


图11 LM2596T 降压电路原理图

Figure 11 LM2596T buck circuit schematic diagram

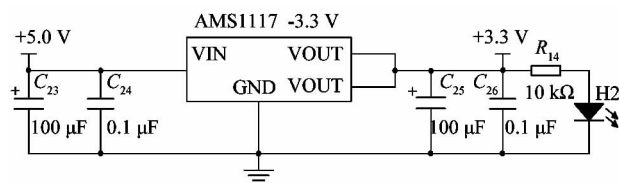


图12 AMS1117 降压电路原理图

Figure 12 Schematic diagram of AMS1117 buck circuit

对于系统中的 4 个 9 g 舵机(2 个 ES08A II 舵机, 2 个 MG90S 舵机),采用单独稳压电源供能方案。该 2 款舵机工作电压均为 4.8 ~ 6.0 V,取额定工作电压 5.0 V,采用 5 A、75 W 降压模块。对于系统中的 4 个扭矩分别为 25 kg·cm 的标准舵机(3 个 PDI-6221MG,1 个 PDI-6225MG-300),同样采用单独稳压电源功能方案。该 2 款舵机工作电压均为 4.8 ~ 7.0 V,快速运动电流 0.6 A,堵转电流达 3.0 A,为保证臂部结构件的运动平稳性,取额定工作电压 6.0 V,采用 FZ12 低波纹降压模块提供独立的转换电源。独立稳压电源使舵机能够获得较大的驱动扭矩和较快的反应速度,以提高夹取与运输物料时的稳定性。同时,避免

舵机在发生堵转时,产生的瞬时大电流烧毁伺服控制芯片^[11-13]。

3.3 步进电机驱动控制

该分拣搬运机器人无需高速移动,但对于移动平稳性和定位精度有较高要求。因此,摒弃常用的以直流电机作为动力源的方案,选用MG42S1型混合式步进电机(HB)驱动铝合金承重轮。步进电机需要与专用的细分驱动器配合控制,如图13所示。MG42S1步进电机的步距角为 1.8° ,即当细分器处于 x 细分状态时,细分器每接收到 x 个方波脉冲,则使输出转轴旋转 1.8° 。当接收到200个方波周期时,输出转轴旋转一周。基于该控制原理,可利用STM32F103C8T6定时器通道的输出比较模式来自由控制,通过改变定时器通道输出方波信号的频率,即可直接控制步进电机的角位移、角加速度。具体转速为

$$n_M = \frac{1.8^\circ \times (f_{STEP} \times 2 \times 60)}{360^\circ \times x} \quad (1)$$

式中: n_M 为MG42S1输出轴转速,r/min; f_{STEP} 为输出比较模式的配置频率,Hz; x 为步进电机细分驱动的细分数。

3.4 舵机驱动控制

在系统程序初始化阶段,需要配置TIM2和TIM3为PWM输出模式1,使所用通道的预装载通过配置 T_{period} 和 $T_{prescaler}$ 得到输出的PWM信号频率为50 Hz,频率计算方法为

$$f_{PWM} = \frac{72}{(T_{period} + 1) \times (T_{prescaler} + 1)} \quad (2)$$

由于舵机需要周期为20 ms的PWM控制信号,所以取 T_{period} 为2000-1,即1999,取 $T_{prescaler}$ 为720-1,即719。通过改变 T_{puls} 即可控制舵机转角, T_{puls} 变化范围在50~250之间,若超出,很可能会永久损伤舵机,在调试时应当警惕^[14-15]。

该款分拣搬运机器人的舵机组驱动目标难点在于机械臂部的3个转动副联调,需要达到非常高的末端平稳性要求,否则,夹取物料后可能会发生掉落、倾斜和碰撞等情况,严重影响系统稳定性和成功率。因此,设计了舵机组联动运算方法,以保证末端执行件保持水平状态。

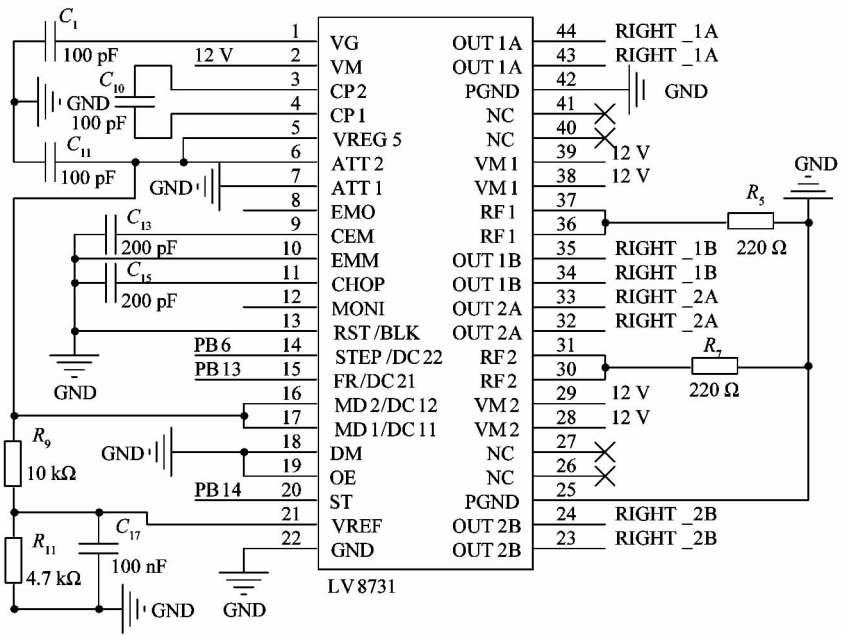


图13 LV8731 细分驱动器外围电路设计

Figure 13 Peripheral Circuit Design of LV8731V Subdivision Driver

```
void ground_paste2(void)
```

```
{
```

```
u8 i=0;
```

```
for(i=0;i<100;i++)
```

```
{
```

```
TIM_SetCompare2( GENERAL_TIMx, 181 - ( 181 - 119 ) * i/100.0 ); //调整 300 x - ( x - y ) * i/100
TIM_SetCompare3( GENERAL_TIMx, 105 + ( 108 - 105 ) * i/100.0 ); //调整 995 x + ( y - x ) * i/100
TIM_SetCompare4( GENERAL_TIMx, 140 + ( 147 - 140 ) * i/100.0 ); //调整 227 x + ( y - x ) * i/100
delay_ms(5);
```

```
}
```

```
for(i=0;i<100;i++)
```

```
{
```

```
TIM_SetCompare4( GENERAL_TIMx, 147 - ( 147 - 144 ) * i/100.0 ); //调整 227 x - ( x - y ) * i/100
delay_ms(1);
```

```
}
```

```
claw_open(); //抓取
```

```
for(i=0;i<100;i++)
```

```
{
```

```
TIM_SetCompare2( GENERAL_TIMx, 172 - ( 172 - 168 ) * i/100.0 ); //抬起 300 x - ( x - y ) * i/100
TIM_SetCompare3( GENERAL_TIMx, 83 - ( 83 -
```

```

81) * i/100.0); //调整 995 x - (x - y) * i/100
TIM_SetCompare4( GENERAL_TIMx, 167 - (167 -
165) * i/100.0); //调整 227 x - (x - y) * i/100
}
claw_close();          //放料
}

```

4 实验测试

根据上述设计与制作过程,完成分拣搬运机器人实物搭建,如图 14 所示。由于物料颜色识别与引导条

带辨别是系统中的重要工作环节,且受光照强度影响^[16-17],为了探究光照强度对系统的影响程度,对小车进行了搬运成功率测试。本次测试地点选在夜间无自然光的实验室内,以 12 盏均匀分布的 Tube5 日光灯作为照明光源,营造不同光照强度的工作环境。在每种光照强度下分别测试 100 次,实验任务设定为将 5 种物料分类运输至指定堆垛区,搬运成功率与光照强度线性关系趋势实验数据如图 15 所示。

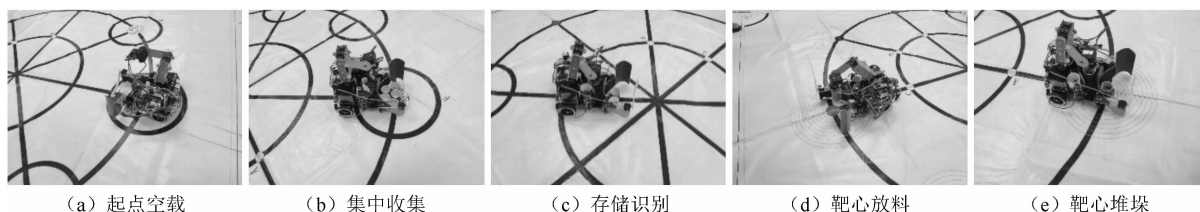


图 14 分拣搬运机器人实物图

Figure 14 Pictures of sorting and handling robot

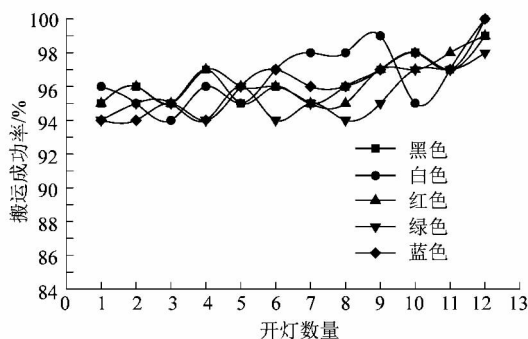


图 15 物料搬运成功率

Figure 15 Material handling success rate

测试结果分析:当光照强度在 1~12 盏日光灯范围变化环境亮度时,系统工作成功率维持在 94% 以上。从图 15 中可知,不同颜色的物料分拣搬运成功率无明显差别,均在较高水平小幅度跳动。总体而言,在不同强度的光照影响下,颜色传感器能够通过白平衡参数调节,准确辨别出黑色、白色、红色、绿色和蓝色物料,灰度传感器稳定辨识引导条带,搬运小车整体工作稳定,系统可靠性较强。

5 结语

在该光电分拣搬运机器人中,循迹子系统具有可实现自动导引的优点,颜色识别子系统具有辅助分类管理物料的优点,仓储分拣子系统具有提升系统搬运效率的优点。相比传统搬运小车,此设计创新性地结合了上述 3 个子系统,为自动分拣搬运物料提供了更加灵活高效的方案,在一定程度上提高了传统搬运小

车的检测感知能力,解决了仓库中多重目标的复杂搬运及堆垛问题,提高了搬运系统的环境适应能力和工作效率。

参考文献:

- [1] MICHALOS G, KOUSI N, MAKRI S. Performance assessment of production systems with mobile robots[J]. Procedia CIRP, 2016, 41: 195-200.
- [2] 林兆花,徐天亮. 机器人技术在物流业中的应用[J]. 物流技术, 2012, 31(7): 42-45.
- [3] DANG Q V, NGUYEN L. A heuristic approach to schedule mobile robots in flexible manufacturing environments[J]. Procedia CIRP, 2016, 40: 390-395.
- [4] 胡正伟. 清扫机器人定位及路径规划研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2010: 16-19.
- [5] 顾威. 六自由度机器人控制与仿真技术研究[D]. 山东大学, 2017: 62-68.
- [6] MONTIEL O, OROZCO-ROSAS U, SEPÚLVEDA R. Path planning for mobile robots using bacterial potential field for avoiding static and dynamic obstacles[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(12): 5177-5191.
- [7] 张军,赵玉刚,杨强,等. 微型自动循迹搬运车控制系统的开发[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(7): 133-136.
- [8] 张梅美. 物流自动寻迹搬运车控制系统设计[D]. 东北林业大学, 2013: 26-30.
- [9] 张岩岩. 自动导引搬运车设计及其路径规划研究[D]. 西安科技大学, 2016: 30.
- [10] 莫太平,杨宏光,刘冬梅. 面向多路线的智能循迹小车的设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2014, 29(4): 6-9.
- [11] 吕书信,张北伟,王泽澄. 基于 STM32 分拣搬运机器人控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9): 101-104.

(下转第 28 页)