

# 基于 STM32 控制的仓储搬运机器人<sup>①</sup>

开思聪, 陶重彝, 孙云飞

(苏州科技大学 电子与信息工程学院 江苏省建筑智慧节能重点实验室, 苏州 215009)

**摘要:** 针对实际工业生产对自动化的需求, 阐明了实现精确搬运的智能机器人的设计. 该机器人运用灰度、颜色传感器完成循迹、颜色识别的导向识别功能; 通过 STM32 产生 PWM 波形控制伺服电机的转动, 精确搬运物料; 模拟真实厂区环境, 规划高容错率行进路线. 实验表明, 机器人设计简单, 易于实现与批量生产, 实用可靠, 可在自动化领域广泛推广.

**关键词:** 智能机器人; 循迹; 颜色识别; 自动化; 精确搬运; PWM

## Automatism Storage Handling Robot Based on STM32 Controller

KAI Si-Cong, TAO Chong-Ben, SUN Yun-Fei

(College of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, SuZhou 215009, China)

**Abstract:** For the need of the actual industrial production, the design of intelligent robot achieving precise handling is illustrated. The robot uses the grey scale sensor, color recognition sensor to complete tracking, the orientation of recognition. By STM32 producing PWM waveform control servo motor rotation, it accurates handing material; Simulates the real environment, path planning of high fault tolerance rate. Experimental results show that robot design is simple, easy to implement and to be batch produced, practical and reliable, and can be widely applied in the field of automation.

**Key words:** intelligent robot; tracking; color discrimination; automation; precise handing; PWM

随着自动化技术飞速发展, 自动化技术在诸多行业的应用得以逐渐深入和拓宽. 仓储搬运机器人的研究和应用的主要目的是提高生产效率, 降低生产成本. 根据实际生产需要, 科学规划物料搬运计划, 降低生产成本, 缩短生产周期<sup>[1-2]</sup>. 李雷研究了在 MCS-51 控制下仓储搬运机器人的设计方法, 本文从机械结构、运动学分析、路径规划和微处理器方面提出改进方案<sup>[3]</sup>.

针对检测对象, 传感器做出相应调整, 循迹模块传感器需对黑白地面情况进行信息采集, 本文采用灰度传感器检测传输数据. 颜色识别模块需区分不同种类物料, 为便于机器人检测, 物料以外表面颜色作为区分标准, 采用颜色传感器检测反馈三原色色值所占比重来确定物料外表面颜色. 灰度传感器仅由一只发光二极管和一只光敏电阻组成, 灰度传感器利用不同检测面对光的反射程度不同, 进行颜色深浅检测, 地

面由黑白构成, 灰度值区分度大, 灰度传感器代替颜色传感器进行循迹传感, 有效降低机器人的生产成本. 机器人快速启动与快速停止均会对搬运精度产生影响, 编程中我们采取连续微分的思想, 将机器人的启动速度设置为低速值, 通过均加速使其逐步达到最高运行速度, 预先将机器人停止时间调快某数值, 借此补偿快速停止因惯性带来的位移误差, 通过多次实验确定数值. 在工业生产中, 两点之间直线最短的设计思想导致容错率低、路径紊乱等问题, 我们采取多线路拼接的设计理念, 基于可靠的循迹模块, 大幅提高机器人容错率, 简化驱动程序.

在工业控制领域, 用户要求单片机具有更快的中断速度, 本文采用 ARM Cortex-M3 嵌入式处理芯片作为控制芯片. STM32 采用了抢占(Pre-emption)中断技术、尾链(Tail - chaining)中断技术、迟到(Late-arriving)

① 基金项目: 国家自然科学基金(61401297); 江苏省自然科学基金(BK20140283)

收稿时间: 2015-11-16; 收到修改稿时间: 2015-12-21 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005233]

中断技术,对中断事件的响应更迅速,相较于文献[3]中使用的MCS-51,优势在于低功耗、低成本、高性能的结合<sup>[4]</sup>.STM32芯片支持移植μC/OS-II系统,μC/OS-II是一种基于优先级的可抢占式的硬实时内核,该系统总是运行就绪条件下优先级最高的任务,提高处理器运行效率.

## 1 场地模拟与路径规划

### 1.1 场地模拟

现实生产活动中,生产车间与物料、成品仓库有一定距离,在仓储搬运机器人设计中,本文选取中国机器人大赛机器人搬运工程项目比赛图纸模拟真实工厂情景<sup>[5]</sup>,如图1.图中,H为机器人出发区域,工厂存在两处物料仓库F、G,仓库中各放有五种由颜色标识不同的物料ABCDE,两仓库中相同颜色物料相同.机器人需将五种物料搬运至对应颜色的生产车间以供生产,所有物料搬运完成,机器人需要回到出发点H.

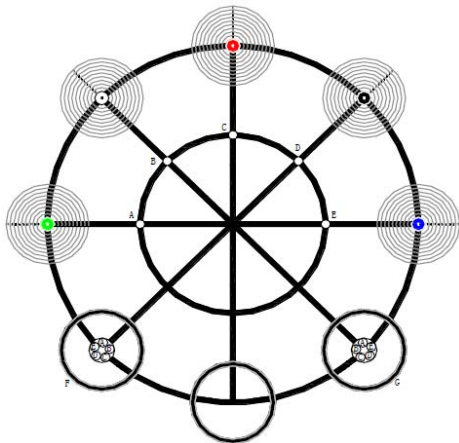


图1 工厂车间模拟图

### 1.2 路径规划

本文机器人搬运算法采用聚合搬运思想,即先将仓库F、G中ABCDE五种物料分别搬运至预备点,再将同一预备点的物料夹取搬运至对应的生产车间,最终机器人返回出发点.聚合搬运较逐个搬运可减少往返物料仓库的时间,节省工作时间,提高搬运效率;为提高容错率,采用多折返搬运组合方式,直线循线相比于曲线循线精度高,进而有效保证搬运机器人行进路线的准确性,提高工作精度<sup>[6]</sup>.

户硕采用逐仓搬运算法,即搬运某仓库物料至中心点,再分拣搬运,在路径规划上采用直线路径循迹<sup>[2]</sup>;

李雷采用逐步搬运算法,即物料逐个搬运至生产车间,在路径规划上采用最短路程思想,即最大化利用圆弧路径循迹<sup>[3]</sup>.

在相同的硬件条件下,采用文献[2]、文献[3]和本文算法的机器人搬运时间、平均精确度和循迹出错率的对比,如表1所示.平均精确度计算方法为以物料外边沿所在同心圆位置为得分,5次搬运得分与满分的比值为平均精确度,如图1所示.

表1 三种机器人搬运时间、平均准确度和循迹出错率对比表

	搬运时间	平均准确度(%)	循迹出错率(%)
基于AT89S52	2分21秒	83.30	5
基于AT89C52	2分37秒	67.45	15
基于M3	1分52秒	94.40	0.7

## 2 硬件结构设计

### 2.1 驱动系统设计

机器人驱动系统由两个伺服电动机拖动的车轮和一个跟随车轮运动的万向轮组成.伺服电动机把所接收到的电信号转换为电动机上的角位移或角速度的变化<sup>[7]</sup>.电动机转速为

$$n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T \tag{1}$$

通过STM32产生PMW波形变化控制伺服电动机侧电压Ua伺服电机的转动方向与转速,控制伺服电机转动速度的脉冲信号如图2所示.高电平持续1.5ms低电平持续20ms,并不断重复控制脉冲序列.该脉冲序列经过零点标定后的伺服电机,伺服电机不会旋转.控制电机运动转速的是高电平持续时间,图2所示是高电平持续时间为1.3ms时,电机顺时针全速旋转;当高电平持续时间1.7ms时,电机逆时针全速旋转.

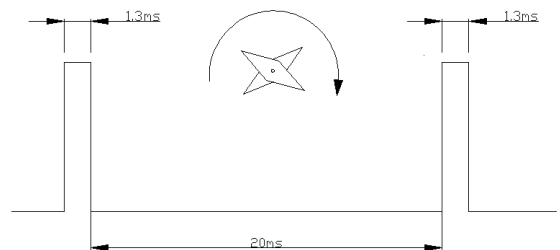


图2 电机顺时针全速转动控制信号时序图

机器人使用7.4V、1000mAh Ni-cd 蓄电池进行电压调节,STM32系统、循迹和颜色识别模块需要5V电

压,我们采用降压稳压芯片集成在电路板中,伺服电动机和直流电动机使用 Ni-cd 蓄电池直接供电.输出直流电压  $V_0$  随输入直流电压  $V_1$ 、输出电流  $I_0$  和环境温度  $T(^{\circ}\text{C})$  的变动而变动,即  $V_0 = \xi(V_1, I_0, T)$ . 输出电压变化量为

$$\Delta V_0 = K_V \Delta V_1 + R_0 \Delta I_0 + S_T \Delta T \quad (2)$$

$$\text{调整因数 } K_V K_V = \frac{\Delta V_0}{\Delta V_1} \Big|_{\Delta I_0=0, \Delta T=0} \quad (3)$$

$$\text{输出电阻 } R_0 R_0 = \frac{\Delta V_0}{\Delta I_0} \Big|_{\Delta V_1=0, \Delta T=0} \quad (4)$$

$$\text{温度系数 } S_T S_T = \frac{\Delta V_0}{\Delta T} \Big|_{\Delta V_1=0, \Delta I_0=0} \quad (5)$$

伺服电机的转速通常要比控制对象的运动速度高得多,一般通过减速机构连接二者,车轮与伺服电动机通过螺帽嵌套相连,车轮外加软性橡胶材料增加车轮摩擦系数.机器人前进时,左右伺服电动机分别以顺、逆时针方向全速旋转,以最高运转速率前进;机器人后退时,左右伺服电动机分别以逆、顺时针方向全速转动,以最高运转速率后退.机器人左右旋转或者循线过程中出现误差需要修正时,采用差速转向控制理论,即左右轮转速不同,偏向轮转速低.为简化处理器控制信号脉冲长短变化,我们规定机器人转向时,偏向轮静止,反向轮全速转动,转向完成即刻恢复转向前运动状态.

户硕采用直流电机驱动器为驱动电机,其内部由高速电动机提供原始动力,带动变速(减速)齿轮组,产生较大扭矩<sup>[2]</sup>.本文机器人采用伺服电动机,伺服靠脉冲来定位,伺服电动机接收到1个脉冲,旋转1个脉冲对应的角度,实现位移,且伺服电动机本身具备发出脉冲的功能,从而伺服电动机每旋转一个角度,都会发出对应数量的脉冲,伺服电动机发出的脉冲和伺服电机接受的脉冲形成了闭环响应,系统得以知道发出了多少脉冲给伺服电动机,同时又接收回来了多少脉冲,能够精确控制电动机转动,实现精确的定位,定位精度可以达到 0.001mm,相较于文献[2]中搬运机器人,本文机器人在搬运精度上性能优越.

## 2.2 执行机构设计

机器人执行机构为夹持器,由两只可以互相咬合的半爪构成,半爪如图3所示.夹持器需要夹紧物料,保证在搬运过程中物料与机器人的相对静止,而无需使用高精度的伺服电动机,基于目标功能与经济可行

性,我们采用直流电动机来拖动夹持器运动,处理器通过 RS232 串口通信,将电流信息传输到直流电动机,控制其张开、闭合.机器人搬运前,夹持器预先处于开启状态,到达预定位置时,循迹模块的传感器将位置信息传递给处理器,处理器向直流电动机传输夹持指令,夹持器闭合,加紧物料;搬运物料至指定位置后,循迹模块的传感器将位置信息再次传递给处理器,处理器向直流电动机传输松弛指令,夹持器张开,物料投递至指定位置,完成搬运任务.

半爪由两片定制硬塑料板通过连接件组成,硬塑料板质量较轻,避免机器人夹持物料后,前端质量较重,重心前移而产生机器人后端万向轮翘起,导致机器人行进不稳定.半爪上侧硬塑料板末端制成齿轮状,方便配合直流电动机齿轮转动.左、右半爪下侧硬塑料板设计时使其高度不相同,便于其交错咬合,避免左、右半爪咬合时相碰,影响夹持效果,导致物料无法正常抓取搬运.

颜色识别模块采用的颜色传感器加装在直流电动机前侧,夹持器采用上、下侧硬塑料板构成夹持半爪,光电二极管得以不断接收入射光,分析返回的 RGB 值可获知机器人前方物料颜色.若采用左、右半圆塑料管组成夹持器,易实现多自由度码垛功能<sup>[8]</sup>,在实际生活中适用于多层圆柱物料搬运,考虑到物料外形种类繁多,且半圆塑料管无法搬运小于或过大于其半径物料,本文所采用夹持器外形具有普适性、经济性的优点.在中国机器人比赛中,部分参赛队伍采用升降结构与夹持器复合工作的设计,将物料堆叠放至物料仓库中心点,精确度有进一步提升.本文拟在后续改进过程中,增加吊钩模块堆叠物料,以提升物料搬运的准确性.

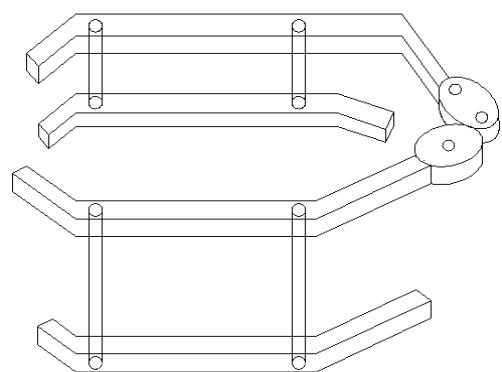


图3 夹持器半爪示意图

### 3 软件流程设计

#### 3.1 循迹模块设计

仓储搬运机器人在工作时，按预先规划的搬运路线行进，当行进出现偏差时，需能够自行检测偏差方向并及时完成恢复；需检测自身所在位置，判断是否达到抓取物料区域和释放物料区域。本文选用灰度传感器通过检测地面黑线分布情况完成上述功能。

本文选用的灰度传感器由普通电阻、光敏二极管电阻和光敏二极管组成。普通电阻作上拉电阻，防止电流过大烧毁灰度传感器；光敏二极管和半导体二极管具有类似结构，管芯为具有光敏特性的PN结，具有单向导电性，故光敏二极管常加上反向电压来工作。若无光照，传感器电路中有很小的饱和反向漏电流，光敏二极管截至，回路光电流趋于零；若有光照，回路漏电流大幅增加，进而产生光电流，光电流随着入射光强度的增强而变大。灰度传感器利用光电流随入射光强弱变化而变化的特性，通过发光二极管照射地面，光敏二极管接受地面反射光，回路光电流随之产生变化，光电流输入至 STM32 所在集成电路，A/D 转换器将电信号转化为灰度数值信号，灰度数值与预先存储的标定值比较，机器人行进路面由 PVC 膜纸敷设，黑PVC膜纸吸收大部分光线，白PVC膜纸反射较多反射光，则高于标定值则为白色，低于标定值则为黑色。

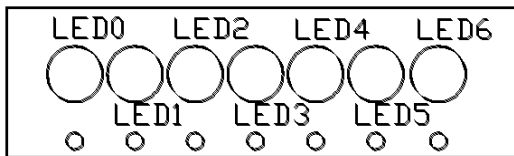


图 4 七通道灰度传感器图

灰度传感器阵列分别安装于机器人前后部，由 2 组七通道灰度传感器平行排布组成，单组七通道灰度传感器如图 4 所示。传感器所产生的电信号变化由 2 组 7 根杜邦线接入 STM32 集成电路 I/O 口。LED3 位于机器人中央，LED2、LED4 位于 LED3 两侧，正常循线时上述三只 LED 应位于黑线上方，其余 LED 则作判断机器人在地图所处位置用。若机器人平稳行进，黑线上方 LED 中的光电流应恒趋于零；当机器人偏离黑线，出现误差时，侧边两只 LED 中必有一只会偏离黑线区域，此时偏离方向的 LED 中将产生光电流，A/D 转换器将此时光电流产生的高电平信号传送至处理器，处理器根据出现光电流的 LED 的位置即可判断机器人

偏离方向。处理器得到机器人所偏离的方向，需要机器人向相反方向运动以修正行进方向，处理器调用控制舵机转向的子程序进行快速调整，恢复其正常方向。方向调节采用微分闭环反馈的方式，多次进行单位角度快速调整，不断检测调整后的机器人是否仍处于偏离黑线的状态，直至调整到正确行进方向，循迹流程图如图 5 所示。

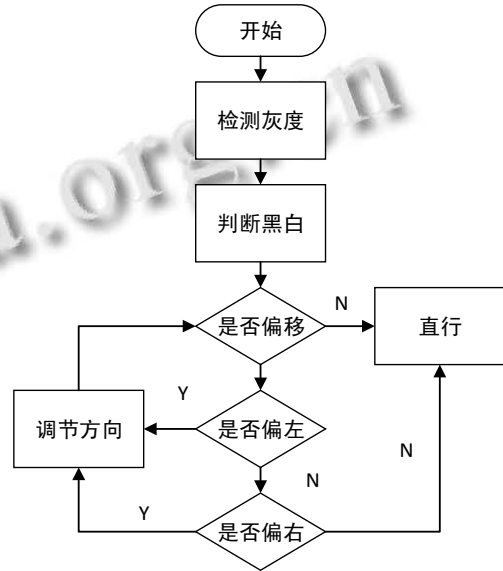


图 5 搬运流程图

多次实验中，我们发现灰度值不仅受黑、白分布情况影响数值大小，同样受光照强度影响数值大小，光照强度不同时，灰度值存在一定波动。在极限情况下，即低光照强度与高光照强度，灰度值变化范围过大，预先存储的标定值无法实时更新，导致机器人无法完成循迹任务。对此，在原有设计的基础上，每组灰度传感器外设置黑色围栏，保证环境光强无法对灰度传感器造成影响。黑色围栏采用矩形设置，规格参数为 5\*10\*8mm，预先在灰度传感器电路板设置镶嵌孔，将黑色围栏镶嵌安装在电路板中。灰度传感器由于产品参数不同，对同一反射面产生的灰度值均不相同，本文取两组七通道灰度传感器所测灰度平均值，对比改进前后在不同光照强度下，灰度值的变化情况，如表 2 所示。

表 2 灰度传感器改进前后灰度平均值对比表

光照强度	无黑色围栏		有黑色围栏	
	黑线灰度均值	白色灰度均值	黑线灰度均值	白色灰度均值

低	553	679	695	804
正常	677	781	698	805
高	795	932	699	805

若机器人在正常光照强度时标定黑白线灰度值, 当光照强度变弱时, 由表 1 数据易得存在部分灰度传感器返回白线灰度值高于正常光照强度下黑线灰度值, 导致循迹模块产生误判, 导致机器人无法正确搬运物料; 当光照强度变强时, 由表 1 数据易得大部分灰度传感器返回黑线灰度值高于正常光照强度下白线灰度值, 导致循迹模块无法正确判别黑白线, 导致机器人丧失全部功能. 通过表 1 数据, 我们分析得在添加黑色围栏后, 灰度值在低、正常、高光照强度下, 变化率为 0.12%, 相较于无黑色围栏时 16.55% 的变化率有大幅减小.

搬运机器人工作流程图如图 6 所示.

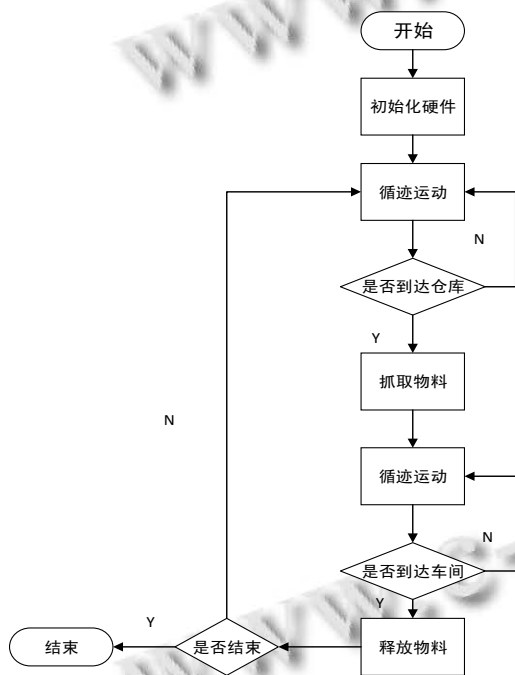


图 6 搬运机器人工作流程图

### 3.2 颜色识别模块设计

由德国物理学家赫姆霍兹的三原色理论可知, 各种颜色是由不同比例的三原色混合而成, 三原色为红 (Red)、绿 (Green)、蓝 (Blue), 用相加混色三基色所表示的颜色模式称为 RGB 模式. 本文设计的仓储搬运机器人搬运由外表面颜色区分的物料, 采用美国 TAOS 公司生产的 TCS230 颜色传感器检测物料 RGB 值<sup>[9]</sup>. 运用三原色理论, 在检测到构成各颜色的 RGB 值后,

即可知道所检测物体的颜色. TCS230 采用 8 引脚 SOIC 表面贴装式封装, 单芯片集成 64 个光电二极管: 16 个带有红色滤波器的光电二极管, 16 个带有绿色滤波器的光电二极管, 16 个带有蓝色滤波器的光电二极管, 16 个可透过全部光信息的光电二极管.

光电二极管在芯片内交叉排列, 最大限度减少入射光辐射不均匀, 提高颜色识别精确度. 在 TCS230 传感器进行颜色识别前, 需要对模块进行白平衡调节, 白平衡即告诉系统什么是白色. 在理论上, 白色是由等量的红色、绿色和蓝色原色光混合而成; 实际中, 白色三原色所占比重不完全相等. 对 TCS230 的光传感器而言, 其对红、绿、蓝三原色的敏感度也不尽相同, 使 TCS230 的 RGB 输出值不相等, 故在 TCS230 传感器工作前需对其进行白平衡调整, 使得其检测到的“白光”中三原色所占比重相等<sup>[10]</sup>.

TCS230 传感器选定某一颜色传感器后, 它只允许该原色通过, 阻止其他原色通过. 即: 当 TCS230 选择红色滤波器时, 绿色和蓝色均被阻止, 入射光中仅红色得以通过, 得到红色光的光强, 同理选择绿色、蓝色滤波器, 得到对应颜色光线的光强. 通过采集到的上述三种原色光的光强, 即可分析投射到 TCS230 传感器上的光的颜色. STM32 处理器调用颜色识别子程序后, 单片机进行 A/D 转换, 将颜色传感器采集的 RGB 数值和预先存储的颜色列表数据进行比较, 采用模糊算法, 得到标准值与距离值  $d$  差值最小的颜色为物料外表面颜色. 我们采用笛卡尔距离<sup>[14]</sup>测得距离值  $d$ , 其表达式为

$$d = \sqrt{(R_u - R_r)^2 + (G_u - G_r)^2 + (B_u - B_r)^2} \quad (6)$$

表达式中  $R_u$ 、 $G_u$ 、 $B_u$  为 TCS230 传感器 RGB 输出值;  $R_r$ 、 $G_r$ 、 $B_r$  为参考颜色传感器值.

张丰华等人的设计中为保证实时性牺牲距离值精度而采用的简化算法<sup>[8]</sup>. 与该方法相比, 本文采用 STM32 可搭载  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  系统, 对任务划分优先级, 高优先级任务优先处理, 减少程序语句执行中的等待时间, 充分保证实时性, STM32 较 MCS-51 系列单片机在处理器性能上有很大飞跃.

颜色识别时需避免外界光线干扰, 否则影响颜色识别结果, 我们将光源、传感器集成在密闭无反射的黑盒中, 减少外界环境对检测精度的影响; 在初次使用 TCS230 模块和断电重启 TCS230 模块后, 我们均对模块进行白平衡调整, 确保检测数值准确.



### 3.3 实验结果

本文设计的搬运机器人结构示意图、实物图如图7~8所示。机器人由夹持器、伺服电动机驱动的主动轮、万向轮、7.4VNi-cd 蓄电池和搭载 STM32 芯片的电路板构成。实验中，机器人完成搬运任务过程如图9a~d所示。图9a为机器人从出发点H出发至物料仓库；图9b为机器人达到物料仓库夹取物料A；图9c为机器人到达生产车间A，夹持器释放从仓库F、G中夹取的物料A；图9d为机器人完成所有搬运任务，返回出发点H。

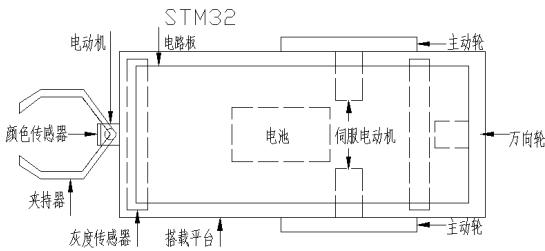


图7 机器人结构示意图

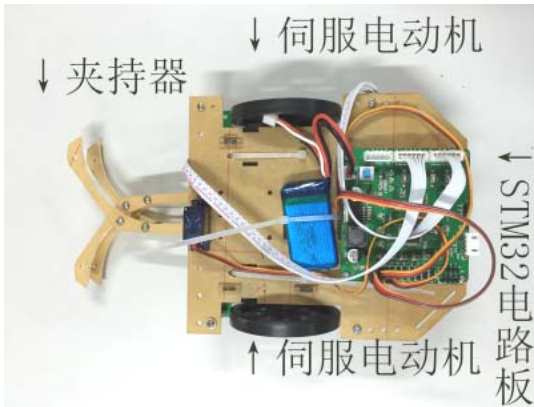


图8 机器人实物图

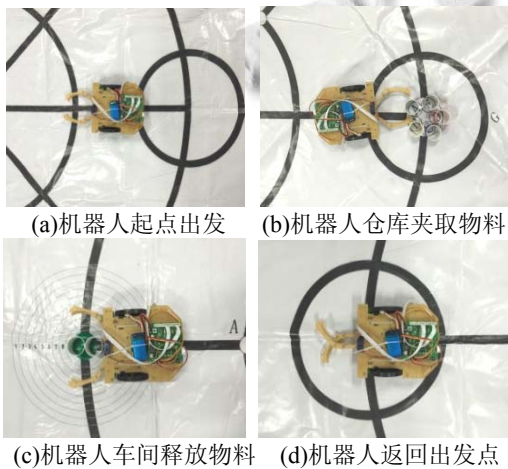


图9 机器人物块搬运全过程

### 4 结论

针对仓储搬运机器人的设计与实现，本文提出了一种基于单片机控制的新型方法，它以 STM32 芯片作为控制核心，嵌入  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统，设计了机器人循迹、颜色识别和物料搬运等功能。本文采用了伺服电动机作为驱动元件，使用了灰度传感器阵列进行循迹，利用颜色传感器实现了对物料颜色的识别，合理规划物料搬运路径与夹持方法，完成仓储搬运机器人的设计与实现。车体设计巧妙，硬件结构简单，电控系统设计合理，通过在测试场地的多次试验，得出循迹效果良好、颜色识别准确、物料搬运稳定，符合设计愿景。基于本文设计的仓储搬运机器人已用于中国机器人大赛，并取得二等奖的成绩。

### 参考文献

- 1 张军,周荣晶,陶卫军.小型室内搬运用移动机器人的研制.化学工程与装备,2011,11:39-42.
- 2 户硕.搬运机器人的设计与制作.煤矿机械,2015,8:18-20.
- 3 李雷.基于 MCS-51 控制的军用自动仓储搬运机器人设计实现系统仿真技术,2011,7(2):100-103.
- 4 王小妮.嵌入式操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  剖析与移植.现代电子技术,2015,4:84-86.
- 5 中国机器人大赛暨 RobCup 公开赛机器人搬运规则. <http://www.rcccaa.org/>.
- 6 李淑霞,杨俊成.一种室内清扫机器人路径规划算法.计算机系统应用,2014,23(9):170-172.
- 7 唐介,刘尧.电机与拖动.北京:高等教育出版社,2014:227-228.
- 8 张丰华,韩宝玲,罗庆生,石琳,黄麟.基于 PLC 的新型工业码垛机器人控制系统设计.计算机测量与控制,2009,17(11):2191-2194.
- 9 谢发忠,邹华东,吴年祥.基于 TCS230 的颜色检测装置及其在智能装配机器人避障中的应用.工程设计学报,2013,1:60-64.
- 10 周中正,王洪栋.TCS230 的 MCU 平台颜色识别方法研究.单片机与嵌入式系统应用,2013,9:29-35.