

面向应急机器人的机械臂无线控制系统设计

刘斯特, 何新霞

(中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 针对处理油气场站有毒气体泄漏事故的应急机器人, 设计一种基于 DSP 和 AR9331 模块的机械臂无线控制系统; 该系统用 6 个舵机配合金属支架搭建机械臂硬件结构, 以 TMS320F28335 DSP 为核心处理器, 利用其 ePWM 模块驱动舵机, 同时通过 AR9331 WiFi 模块和 DSP 的 SCI 模块实现 DSP 与上位机之间的无线通信, 由此完成了该无线控制系统的全部搭建; 实验过程中, 在上位机端通过无线通信模块向 DSP 发送各种控制指令, 对各个舵机进行协调控制, 从而控制机械臂进行清理障碍物、启闭阀门等应急处理操作, 验证了该无线控制系统的可行性; 实验结果表明该机械臂无线控制系统控制精度高、调节速度快、可靠性高; 机械臂能够在 0.5 s 内接收并完成指令, 舵机角度误差在 1° 以内, 满足应急机器人的操作需求。

关键词: 应急机器人; 机械臂; 无线控制; DSP; AR9331; PWM; SCI

Design of Wireless Control System of Manipulator for Emergency Robot

LIU Site, HE Xinxia

(College of New Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Aiming at emergency robot dealing with toxic gas leakage accidents in oil and gas stations, a wireless control system for manipulator based on DSP and AR9331 modules is designed. The system uses 6 servos cooperating with the metal bracket to build the hardware structure of the manipulator. It uses the TMS320F28335 DSP as the core processor and uses its ePWM module to drive the servos. At the same time, the AR9331 WiFi module and the DSP SCI module realize the Wireless communication between the DSP and the host computer. Thus the entire construction of the wireless control system is completed. During the experiment, the host computer sends various control commands to the DSP through the wireless communication module to control harmoniously each servo, so as to control the manipulator to clean up obstacles, open and close the valve and other emergency handling operations, the feasibility of the wireless control system is verified. Experimental results show that the manipulator wireless control system has high control accuracy, fast adjustment speed and high reliability. The manipulator can receive and complete the instructions within 0.5 s, and the steering gear angle error is within 1° , which meets the operational requirements of the emergency robot.

Keywords: emergency robot; manipulator; wireless control; DSP; AR9331; PWM; SCI

0 引言

机械臂作为智能机器人的一个重要组成部分, 可以根据上位机下达的指令, 模仿人类手臂及手部动作, 完成抓握、屈臂、旋转等动作, 从而达到控制人员预期的工作效果。一个多自由度机械臂控制系统由上位机、通讯系统、控制系统、电源模块、机械结构(支架、底座、舵机、机械手爪)等诸多模块单元组成, 其中上位机的作用是发送控制指令, 并对机械臂进行状态监控, 通讯系统连接上位机与控制系统, 控制系统则负责指令的处理和对机械臂的控制。

应急机器人是针对处理油气场站有毒气体泄漏事故的特种作业机器人, 采用履带式车体, 具有一个六自由度机械臂, 能够通过无线通信模块进行远程控制, 并且能够通过传感器和摄像头将机器人周围的环境参数和现场图像传输给上位机控制端, 方便操作人员了解机器人的工作环境,

从而开展应急处理工作。

当油气场站内部发生气体泄漏事故时, 事故现场可能存在各种安全隐患, 应急机器人可以代替工作人员进入事故现场, 采集现场环境参数(气体浓度、环境图像), 让工作人员了解现场情况, 并完成启闭气体阀门等应急处理工作, 从而尽量避免二次灾害以及人员伤亡^[1]。而为了方便机器人进行应急处理工作, 一个在工作过程中可以由操作人员远程控制, 用来完成快速清障、启闭阀门等工作的机械臂, 是应急机器人的一个不可或缺的组成部分。

本文设计一个机械臂无线控制系统, 以 TI 公司的 TMS320F28335 DSP 为数字信号处理器实现对舵机机械臂的控制, 基于高通公司的 AR9331 WiFi 模块建立无线网络, 从而搭建了一个 DSP—WiFi 模块—上位机的线形实验平台^[2]。以该实验平台为基础开展机械臂的调试实验, 验证机械臂的各项功能满足设计要求。

收稿日期: 2021-08-27; 修回日期: 2021-11-02。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0802305)。

作者简介: 刘斯特(1996-), 男, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 主要从事电力电子与电力传动方向的研究。

通讯作者: 何新霞(1966-), 女, 河南滑县人, 副教授, 主要从事油气测控技术, 电力传动与控制系统方向的研究。

引用格式: 刘斯特, 何新霞. 面向应急机器人的机械臂无线控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 100-105.

1 系统结构及原理

该系统由 5 个部分组成: 舵机机械臂、电源模块、DSP、WiFi 模块、上位机。其中上位机为笔记本电脑, 通过调试软件可以向 DSP 发送控制指令。WiFi 模块的控制芯片选型为 AR9331 芯片, 以该芯片为中心搭建的 WiFi 模块可以通过 DSP 的串行通信 (SCI, serial communication interface) 模块与 DSP 相连, 通过无线网卡与上位机相连, 从而建立通信网络实现上位机与机械臂的实时通讯。DSP 作为核心处理器则是负责接收上位机的控制指令以及依照指令发出脉冲宽度调制 (PWM, pulse width modulation) 信号控制舵机动作。而机械臂是由 6 个舵机和金属支架组装而成, 是整个系统的动作主体, 接收 PWM 信号后转动相应的角度, 使得机械臂能够完成不同的动作。电源模块则为机械臂的 6 个舵机提供 5 V 供电。机械臂无线控制系统的原理图如图 1 所示。

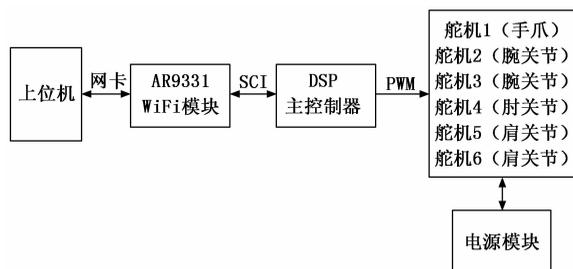


图1 机械臂无线控制系统原理图

2 硬件设计

2.1 数字信号处理器

TMS320F28335 DSP 是 TI 公司研发的一款适用于数字信号处理运算的微处理器, 拥有 12 路脉宽调制通道 PWM, 6 组脉冲捕获单元 CAP, 3 个 SCI 串行通信通道, 12 个可配置外部中断, 88 个通用数字量输入/输出接口 (GPIO, general-purpose input/output), 运算能力强大, 满足机械臂控制系统的需求, 因此选择 F28335 DSP 作为机械臂无线控制系统的主控制器^[3]。

28335 DSP 作为主控制器的作用包括 2 个部分: 一是利用 SCI 模块接收 WiFi 模块传输过来的控制指令, 并对其进行解析; 二是通过增强型脉宽调制模块 (ePWM, enhanced PWM modules) 发出 6 路独立的 PWM 控制信号控制舵机动作。

1) SCI 模块:

SCI 模块的通信方式属于异步串行通信。与并行通信相比, 虽然串行通信传输速度较慢, 但是串行通信可以同时传输数据信息和控制信息, 因此串行通信占用的硬件空间更小, 需要的数据线路更少, 其传输成本更低, 更适合远距离通信; 相较于同步通信来说, 异步通信中收发双方的设备可以拥有独立的时钟脉冲信号, 由各自的时钟实现数据的发送和接收, 因此传输数据更加自由、灵活^[4]。

SCI 是一个双线异步串口, 由发送和接收两根信号线组

成。F28335 内部有 3 个 SCI 模块, 每个模块各有一个发送器 (TX) 和接收器 (RX), 同时 SCI 模块的发送器和接收器还各有一个 16 级深度的 FIFO 队列缓冲^[5]。SCI 模块框图如图 2 所示。SCI 模块通过接收引脚接收数据, 存放在接收移位寄存器中, 当 DSP 准备读取数据时, 数据由移位寄存器存入接收数据缓冲寄存器; 当 DSP 准备发送数据时, CPU 将数据存入发送数据缓冲寄存器, 再将数据转入移位寄存器中, 最后将数据移位到发送引脚上, 通过发送引脚发送数据。

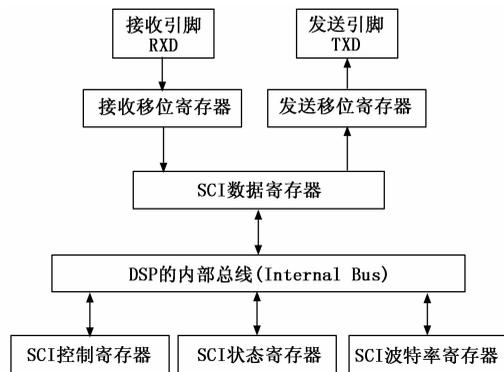


图2 SCI 模块框图

28335 DSP 通过 SCI 模块的串行接口 RX 可以接收从上位机发出、经由 WiFi 模块传输的控制指令。

2) ePWM 模块:

PWM 控制技术就是对脉冲宽度进行调制的技术。由采样控制理论中的重要结论——面积等效原理 (冲量相等而形状不同的窄脉冲加载到具有惯性的环节上时, 其效果基本相同, 冲量即窄脉冲的面积) 可得, 将原始波形如正弦波, 可以用冲量相等的一系列窄脉冲代替, 这些窄脉冲幅值相等, 宽度按正弦规律变化, 这就是 PWM 波形。而要改变等效输出信号的幅值时, 只要按照统一比例系数改变各脉冲宽度即可^[6]。

28335 DSP 的 ePWM 模块共有 6 个 PWM 单元, 每个 PWM 单元相互独立, 互不干扰, 但可以通过同步时钟信号将所有单元联系起来。每个 PWM 单元由两路 PWM 输出信号组成, 分别为 ePWMxA 和 ePWMxB, 共 12 路 PWM 信号^[7]。通过控制 DSP 输出 6 路独立的 PWM 信号就可以控制机械臂上的 6 个舵机的旋转角度, 从而操控机械臂做出各种动作。

2.2 舵机机械臂

舵机是由一个小型的直流电机、一个减速齿轮组、位置反馈电位器和控制电路板 (包括一个电压比较器、输入信号和电源) 组成的^[8]。作为一种位置 (角度) 伺服驱动器, 舵机具有输出精度高, 控制简单等特点^[9], 它的三条输入线分别是 5 V 电源线 VCC、地线 GND 和控制信号线。

舵机的控制原理如下: 控制信号 (PWM 信号) 通过信号线输入, 由控制电路板接收该信号, 产生一个直流偏置电压, 该偏置电压与位置反馈电位器测得的反馈电压比较

之后,得到一个差分电压输出,该差分电压经过控制电路板处理后控制直流电机的转动方向和速度,电机转动带动减速齿轮组运转,与齿轮组同轴的舵盘被带动,转动一定角度后停止。

本文中机械臂所采用的舵机是 MG995 舵机,旋转力矩大 (13 kg/cm),响应速度快 (0.17 s/60°)。MG995 舵机是一种 180°舵机,通过信号线输入周期为 20 ms、脉宽 0.5~2.5 ms 的 PWM 信号,即可调节舵机的旋转角度。其中脉宽 1.5 ms 的基准信号对应中间位置 90°^[10]。舵机旋转角度与输入 PWM 信号脉宽的关系见表 1。

表 1 舵机旋转角度与 PWM 脉宽的关系

| 角度/° | 0 | 45 | 90 | 135 | 180 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 脉宽/ms | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |

本文中应急机器人机械臂的主要作用是完成启闭阀门、清理障碍物等工作,因此机械臂必须具有足够的自由度,能够灵活地进行操作。本文采用六自由度机械臂,该机械臂采用仿人手臂结构,大体可以分为大臂、小臂和手部 3 个部分,大臂通过肩关节与底座相连,通过肘关节与小臂相连,小臂通过腕关节与手部相连。机械臂的硬件组成部分包括机械手爪、金属支架、MG995 舵机、底座,由舵机模仿人手臂各个关节,各个关节之间通过 U 型支架连接,而机械手爪作为手部由舵机控制开、合^[11]。舵机通过主控制器 DSP 的 ePWM 模块进行控制,调节 PWM 信号的脉冲宽度,即可调节舵机的旋转角度,从而控制机械臂动作^[12]。

机械臂实物图如图 3 所示,为六自由度机械臂,①~⑥为舵机编号。机械臂总长 428 mm,可以抓起重达 500 g 的物品,其中舵机的反应速度可达 0.17 s/60°,考虑到控制指令的无线传输及处理,机械臂可以在 0.5 s 以内实现各种动作。

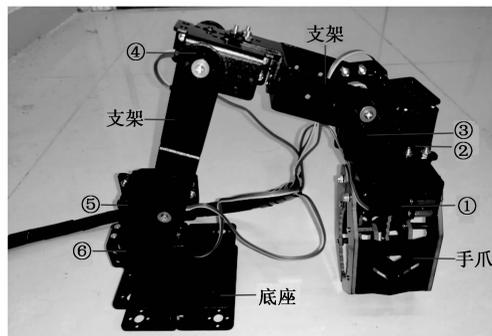


图 3 机械臂实物图

2.3 WiFi 模块

WiFi 技术是一种用来实现电子设备之间数据交换以及接入互联网的无线通信技术。WiFi 无线网络包括 2 种类型的拓扑结构:基础网和自组网。基础网的定义是以无线接入点 (AP) 为中心,各个站点 (STA) 之间通过 AP 进行数据的双向传输;而自组网的定义则是各个 STA 之间直接通讯,不需要通过 AP 转发^[13]。两种拓扑类型的主要区别

在于各个站点之间能否直接进行通讯。

无线控制的优势在于组件网络时免去布线工作,节省了安装成本,简化了网络结构,而且无线控制控制范围广,传输速度快,可以满足系统各个方面的需求。

由于设计需要,本文采用基础网的拓扑结构,将 WiFi 模块设置为 AP 无线接入点,将 DSP 控制器和上位机 (电脑) 设置为 STA 站点,从而构建一个无线控制系统。

本文采用高通 AR9331 WiFi 模块作为 DSP 与上位机之间的通信模块。AR9331 WiFi 模块预置 openwrt 路由系统,还拥有 32 M 内存,4M Flash,以及多种外部接口 (USB2.0、SCI 串口、百兆网口、GPIO),串口频率为 9 600,同时该模块符合国际标准的 IEEE 802.11b/g/n 协议,采用 DSSS、OFDM、BPSK、QPSK、CCK 和 QAM 基带调制技术,能自适应路由器等设备的无线热点,最高连接速率可达 150 Mbps,可以实现视频传输和指令双向传输功能^[14]。因此 AR9331 WiFi 模块十分适合该无线控制系统,能够建立一个稳定的无线网络,实现舵机机械臂的无线控制。

2.4 电源模块

本文中舵机的电源模块是一个 12~3.3/5 V 电源转换模块,电源是由 3 节 18 650 锂电池组成的电池组,经过电源转换模块进行电压变换后得到舵机需要的 5 V 直流电压。锂离子电池具有重量轻、容量大、无记忆效应及不含有毒物质等优点,因而得到了普遍应用。锂离子电池的能量密度很高,它的容量是同重量的镍氢电池的 1.5~2 倍,而且具有很低的自放电率。由锂电池作为供电电源可以为机械臂无线控制系统提供稳定的直流供电电压。

3 软件设计

机械臂无线控制系统的软件架构基于 TI 公司为 DSP 开发人员提供的集成开发环境——CCS6.0 程序开发平台。CCS 包含一整套用于开发和调试嵌入式应用的工具,它包含了用于优化的 C/C++ 编译器、源码编译器、项目构建环境、调试器、描述器以及多种其他功能^[15]。CCS 将集成软件开发环境的框架优点和 TI 先进的嵌入式调试功能相结合,为嵌入式开发人员提供了一个功能强大的开发环境^[16]。

本文中控制系统程序的主要功能包括输出 PWM 信号、SCI 串行通信、对上位机指令进行解析。

3.1 软件设计思路和编程方法

1) PWM 模块:

首先要对 DSP 的 ePWM 模块进行 GPIO 初始化,让对应的 6 个 GPIO 引脚进入 PWM 模式,并且计数模式选为向上一计数模式。中央处理器 (CPU, central processing unit) 的时钟频率默认为 150 MHz,因此选择通过设置时基控制寄存器对时钟频率进行 48 分频,分频后的时钟频率为 3.125 MHz^[17]。同时舵机 PWM 控制信号的周期为 20 ms,即频率为 50 Hz,可以根据公式 (1) 计算得到时基周期寄存器的值 PRD。

$$PRD = \frac{3.125 \times 10^6}{2 \times F_{PWM}} = 31\ 250 \quad (1)$$

时基周期寄存器的值为 31 250, 对应 PWM 控制信号的周期 20 ms。此时 PWM 占空比 D 可通过计数比较寄存器的值 cmp 和时基周期寄存器的值 PRD 计算得到, 如公式 (2) 所示:

$$D = \frac{cmp}{PRD} \quad (2)$$

由此可以得到计数比较寄存器的值 cmp 与 PWM 信号脉宽的关系见表 2。

表 2 cmp 与 PWM 脉宽的关系

| | | | | | |
|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| cmp | 782 | 1 562 | 2 343 | 3 125 | 3 906 |
| 脉宽/ms | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 |

ePWM 模块设置程序的部分程序如下所示:

```
void Init_ePWM(void)
{
    InitEPwm4Gpio();
    EPwm4Regs.CMPCTL.all=0;
    EPwm4Regs.AQCTLA.all=0x0090;
    EPwm4Regs.AQCTLB.all=0x0900;
    .....
    EPwm4Regs.TBCTL.all=0x2B0E;
    EPwm4Regs.TBPRD=31250;
    EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA = cmp;
}
```

2) SCI 模块:

首先初始化 GPIO 引脚, 使其进入 SCI 模式, 然后启用 SCI 接收中断, 对 SCI 模块进行参数的初始化设置^[18]:

①复位 SCI 模块, 使能接收器和发送器以及对应的接收中断和发送中断。

②设置 SCI 串行通信的数据格式为 1 位停止位, 无奇偶校验位, 8 位数据位。

③设置串行通信的波特率为 9 600。

当上位机发送的控制指令经过 WiFi 模块传输给 DSP 时, 程序跳转 SCI 接收中断, 通过 SCI 模块的接收器接收每组控制指令, 每组指令包括 3 个 8 位整型数据, 每次跳转 SCI 中断就会接收一个 8 位数据并将该数据赋值给一个数组, 3 次中断之后该数组内的数据就是完整的控制指令。接收完一组指令后 DSP 会开始执行指令解析程序, 将上位机的控制指令转换为对应的舵机动作。

SCI 模块初始化程序如下所示:

```
void Init_scib(void)
{
    ScibRegs.SCICTL1.bit.SWRESET = 0;
    ScibRegs.SCICCR.all = 0x0007;
    ScibRegs.SCICTL1.all = 0x0003;
    ScibRegs.SCICTL2.all = 0x0003;
    ScibRegs.SCICTL2.bit.TXINTENA = 1;
    ScibRegs.SCICTL2.bit.RXBKINTENA = 1;
    #if (CPU_FRQ_150MHZ)
```

```
ScibRegs.SCIHBAUD = 0x0001;
ScibRegs.SCILBAUD = 0x00E7;
#endif
ScibRegs.SCICTL1.all = 0x0023;
```

3) 指令解析程序:

当 DSP 接收到来自上位机的控制指令之后, 需要将该指令进行解析。在指令解析程序中, DSP 需要根据接收到的指令判断需要动作的舵机编号, 并根据给定的旋转角度计算计数比较寄存器的值 cmp (对应 PWM 信号的脉宽), 从而输出正确的 PWM 控制信号驱动舵机^[19]。假设给定的旋转角度为 x ($0 \sim 180^\circ$), 计算 cmp 的过程如公式 (3) 所示:

$$cmp = \frac{x}{180} * (3\ 906 - 782) + 782 = \frac{x}{180} * 3\ 124 + 782 \quad (3)$$

舵机的旋转角度 ($0 \sim 180^\circ$) 需要先由上位机转换成十六进制的数据 ($0x00-0xB4$) 才能发送。上位机控制指令的格式见表 3。

表 3 上位机控制指令格式

| 数据 | 意义 |
|--------------------|-----------|
| 0xFF | 起始位 |
| 0x01 | 类型位: 舵机指令 |
| 0xXX(01~06) | 命令位: 舵机编号 |
| 0xXX(00-B4/0-180°) | 数据位: 舵机角度 |
| 0xFF | 终止位 |

指令解析程序如下所示 (buffer [3] 数组为指令数组, 负责存放类型位、命令位和数据位指令):

```
void command(void)
{
    if(buffer[0] == 0x02)
    {
        switch(buffer[1])
        {
            case 0x01: angle[0]=buffer[2];
                Servo1(angle[0]);
                break;
            .....
        }
    }
}

void Servo1( Uint16 x)
{
    cmp = (x/180.0) * 3124 + 782;
    cmp = (int)cmp;
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = cmp;
}
```

3.2 软件实现流程图

TMS320F28335 DSP 是机械臂无线控制系统软件的运行主体, 当系统启动后, 操作人员在上位机端发出控制指

令, 通过 WiFi 模块将指令传输给 DSP, DSP 接收指令后对指令进行解析处理, 并对舵机发出 PWM 控制指令^[20]。DSP 的程序流程图如图 4 所示。

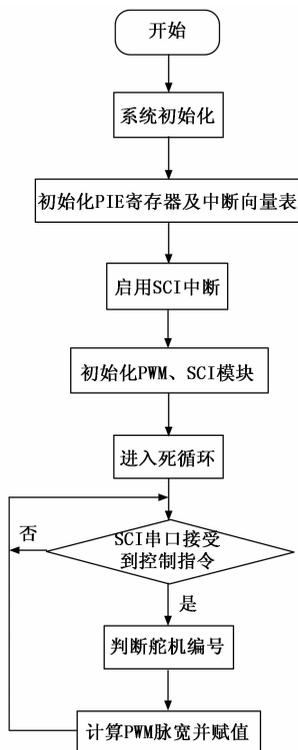


图 4 程序流程图

4 结果与分析

面向应急机器人的机械臂无线控制系统实验平台如图 5 所示, 本文基于该实验平台对机械臂进行性能测试。其中, 车身为应急机器人本体 (履带式结构), 作为系统各个模块的载体; 电源模块为舵机机械臂提供稳定的 5 V 电压支持; DSP 与 6 个舵机和 WiFi 模块相连, 通过 WiFi 模块与上位机沟通, 接收控制指令后控制舵机旋转, 从而完成不同的动作以进行应急操作。

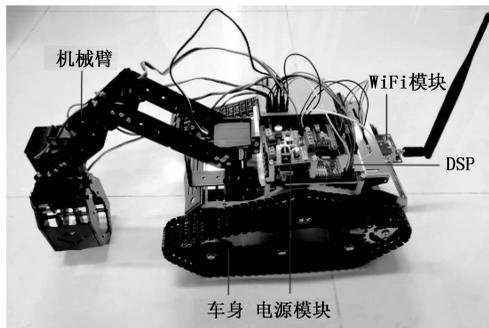


图 5 系统实验平台

在实验调试过程中, 首先要设置 WiFi 网络参数: 使用 TCP Client 模式, 将远程主机地址设为 192.168.1.1, 远程主机端口设为 2001, 从而建立无线通信网络, 实现 DSP 与上位机的链接。系统上电后, 通过上位机发出控制指令,

控制机械臂完成清障实验, 该实验过程如图 6 所示。

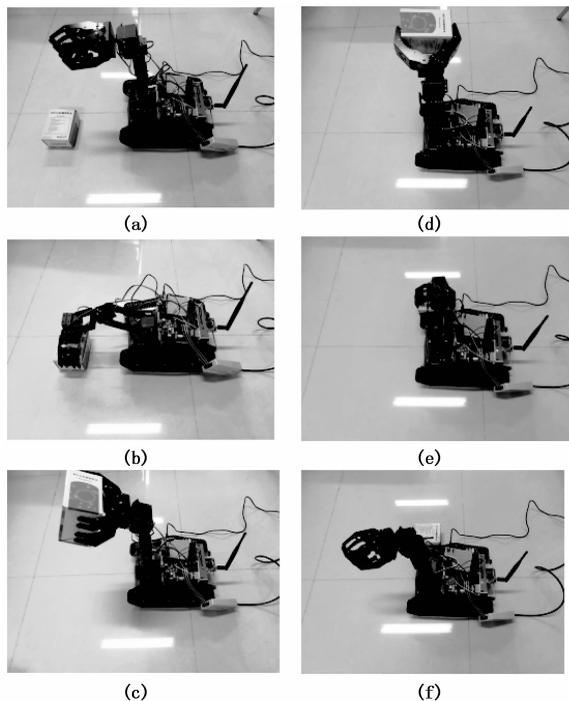


图 6 清障实验过程

实验结果表明, 当应急机器人前方出现障碍物时, 操作人员可以通过控制机械臂将前方障碍移到侧方, 让机器人能继续前进^[21], 执行下一步操作。在上位机发出控制指令后, 机械臂能够无延迟反应 (机械臂响应时间在 0.5 s 以内), 做出相应的动作, 包括抓握、关节旋转等动作, 完成清障任务, 同时经过测量, 舵机旋转角度的误差在 1° 以内, 满足设计要求。

5 结束语

应急机器人是为了处理油气场站突发有毒气体泄漏事故的特种机器人, 其机械臂模块需要帮助机器人在复杂的事故现场环境中顺利前进。本文以 TMS320F28335 DSP 和 AR9331 WiFi 模块为核心搭建实验平台, 设计了一个机械臂无线控制系统, 该系统具有灵敏度高、响应速度快、动作精度高等优点, 机械臂可以完成清理障碍等操作, 能够满足应急机器人的工作需求。

参考文献:

- [1] 杨康建. 履带复合式救援机器人运动控制系统设计 [D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
- [2] 潘辉, 何新霞, 刘斯特. 基于 A* 算法的油气安全智能巡检机器人设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 230-233.
- [3] 张兵, 杨浩. 基于 TMS320F28335 的直流无刷电机控制技术应用 [J]. 科技与创新, 2021 (1): 167-168.
- [4] 薛一哲, 吴云, 王昭, 等. 基于 DSP 串行通信接口开发的研究 [J]. 航空计算技术, 2018, 48 (1): 95-97.
- [5] 于明. TMS320F28XX 系列 DSP 测试方法研究与实现 [J]. 电子测试, 2016 (13): 9-12.

- [6] 张旭. 基于 DSP 的电动舵机伺服系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [7] 金卫. 基于 DSP 的双闭环直流电机调速实验系统设计 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [8] 王凤祥, 张志杰, 陈昊泽. 六自由度机械臂系统设计与控制方式研究 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (4): 1-8.
- [9] 冯张银, 裴杰仁, 揭俊壕, 等. 基于 STM32 单片机的履带式多功能机器人 [J]. 自动化应用, 2019 (4): 104-105.
- [10] 王梦雅, 杨志刚. 基于 LabVIEW 舵机机械臂控制 [J]. 机械工程与自动化, 2017 (1): 181-182.
- [11] 贾晓勋. 矿井救援机器人运动控制系统平台的设计 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [12] 陈朝大, 杜启亮, 秦传波, 等. 基于 DSP 平台的排爆机械臂控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2014, 42 (3): 58-61.
- [13] 张建伟. 数字无线局域网的关键技术及网络结构研究 [J]. 国外电子测量技术, 2018, 37 (5): 78-84.
- [14] 刘天保. 2. 4G 无线 AP 通信系统的设计与实现 [D]. 长沙: (上接第 53 页)
- [15] 袁浩钊. 履带式排爆机器人运动控制系统设计与实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [16] 葛少磊. 履带式移动机器人运动控制系统设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [17] 王梦莲. 基于 DSP 的二自由度关节直流无刷电机控制系统开发 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [18] 齐杨. 六轴工业机械臂运动控制系统设计与实现 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2019.
- [19] 王慧, 李伟. 基于 Arduino 控制的多自由度机械臂系统设计 [J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2017, 16 (4): 6-9, 13.
- [20] 徐善军, 任书楠, 杜婧, 等. 基于 DSP 的高压带电作业专用机器人一体化关节研制 [J]. 制造业自动化, 2021, 43 (3): 143-146.
- [21] 肖志远. 基于 DSP+FPGA 的排爆机器人控制系统设计与实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [11] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition [C] // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016: 770-778.
- [12] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. Cbam: Convolutional block attention module [C] // Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), 2018: 3-19.
- [13] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection [C] // Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, 2016: 779-788.
- [14] REN S Q, HE K M, et al. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 39 (6): 1137-1149.
- [15] YU B S, TAO D C, et al. Anchor Cascade for Efficient Face Detection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 5 (28): 2490-2501.
- [16] SHENGGKAI WUA, et al. IoU-balanced Loss Functions for Single-stage Object Detection [J]. Computer Science, 2020: 05641.
- [17] ZHU X, CHENG D, ZHANG Z, et al. An empirical study of spatial attention mechanisms in deep networks [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2019: 6688-6697.
- [18] LIANG B, LIU Q, XU J, et al. Target-specific sentiment analysis based on multi-attention convolutional neural network [J]. Computer Research and Development, 2017, 54 (8): 1724-1735.
- [19] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks [C] // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2018: 7132-7141.
- [20] PAN S J, YANG Q. A Survey on Transfer Learning [J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 2010, 22 (10): 1345-1359.

4 结束语

本文提出了一种融合卷积注意力机制和 SSD 模型相结合的防震锤检测方法, 将传统 SSD 模型中主干网络用 ResNet 网络来替代, 加快了网络的推理速度和特征提取能量, 同时在模型中融入 CSAM 注意力模块, 更好地区分图像前景与背景, 训练时采用了迁移学习大大地减少了网络的训练时间。本文提出的检测方法在标准数据集 VOC2007、COCO2017 以及自建数据集都有较好的表现, 为输电线路关键部件的检测提供了新的思路方法。

参考文献:

- [1] 刘欢, 等. 电力线路无人机巡检图像的目标检测与缺陷识别 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [2] 徐晓宇, 等. 高压输电线路巡检图像缺陷检测算法研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
- [3] 宋伟, 等. 高压输电线防震锤锈蚀缺陷检测 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (S1): 113-117.
- [4] 金立军, 等. 基于类 Haar 特征与级联 AdaBoost 算法的防震锤识别 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24 (9): 1806-1809.
- [5] 冯薇玺, 等. 基于深度学习的输电线路防振锤故障检测 [J]. 自动化与仪器仪表, 2020 (11): 65-68.
- [6] 贾立业, 等. 基于语义分割和空间上下文信息的防震锤识别 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (1): 200-205.
- [7] 焦润童, 等. 基于 Faster RCNN 算法的输电线路防震锤识别研究 [J]. 长春工程学院学报, 2021 (22): 38-43.
- [8] 翁智, 等. 基于改进 YOLOv3 的高压输电线路关键部件检测方法 [J]. 计算机应用, 2020, 40 (S2): 183-187.
- [9] 王森, 等. 输电线路图像上防震锤检测算法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [10] LIU W, ANGUELOV D, et al. Ssd: Single shot multibox detector [C] // European conference on computer vision. Springer, Cham, 2016: 21-37.