

第七届

全国大学生集成电路创新创业大赛

CICIEC

基于 RobeiEDA 工具 FPGA 开发的智能六足可夹取机器人
(项目设计报告)

报告类型*: 设计报告

参赛杯赛*: Robei 杯

作品名称*: 基于 Robei 工具 FPGA 开发的智能六足可夹取机器人设计

队伍编号*: CICC1574

团队名称*: 哆啦 a 梦之队

基于 Robei 工具 FPGA 开发的智能六足可夹取机器人设计

Design of intelligent hexapod clip-able robot based on Robei tool FPGA

团队名称：哆啦 a 梦之队

团队编号：C1001574

团队成员：刘一鸣 赵思汉 李娜

简介：近几年自然灾害频繁发生，自然灾害过后，救援人员往往面对的是一片废墟，传统的智能救援小车往往无法在这种复杂的路面上行驶，以至于救援人员无法勘察废墟地下的情况，这对救援行动造成了巨大的影响，延误了救援时间，增大了自然灾害所带来的损失，且有些受灾地形复杂，作业环境危险，对搜救人员的生命健康安全更是一大威胁，且更可能会由于救援不及时对受困者造成进一步的伤害。

为了加快救援效率，保障救援人员的安全，特别是一些复杂的路面情况下，我们设计了这块可远程操控实时勘察周围情况的六足搜救机器人。这款机器人由蓝牙接受数据，携带机械臂，摄像头，和其他传感器模块，可以远程操控其在复杂的地面情况上行走，并且实时传回环境情况，提供救援所用的环境数据，操控简单，并且，由于携带一个机械臂，它可以协助救援人员夹取并运输物品. 或者搬开废墟。并且，该机器人还含有语音模块，使人机交互更加简单，节省了许多操作时间，方便救援的展开。

此外，本搜救机器人还搭载了编程功能，拓展了该机器人的应用场景，由于它的硬件设施，工业上它可以拥有搬运，操作精密仪器等功能，居家办公时，可以使用它实时监控家庭，对家里环境进行一定程度上的改变。

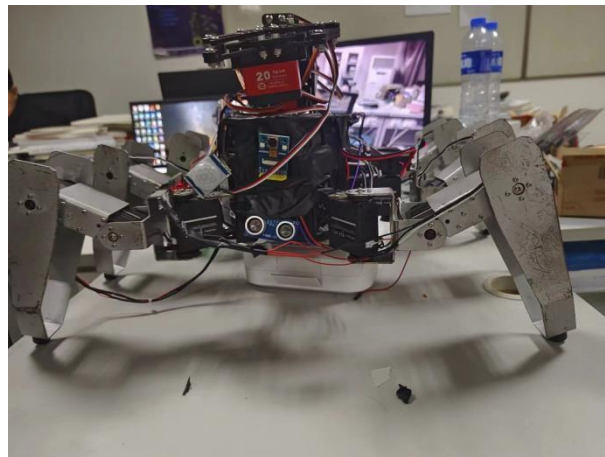
经过系统设计与调试，机器人可以达到预期的要求，随着时间的推移，机器人还可以不断的完善，可以更好的为行业服务。

Introduction: In recent years, natural disasters occur frequently. After natural disasters, rescue workers are often faced with a pile of ruins. Traditional intelligent rescue cars often cannot drive on such complex roads, so that rescue workers cannot investigate the underground situation of the ruins, which has caused a huge impact on rescue operations, delayed rescue time, and increased the loss caused by natural disasters. In addition, some of the affected terrain is complex and the working environment is dangerous, which is a big threat to the life and health and safety of search and rescue personnel, and is more likely to cause further harm to the trapped people due to the delayed rescue.

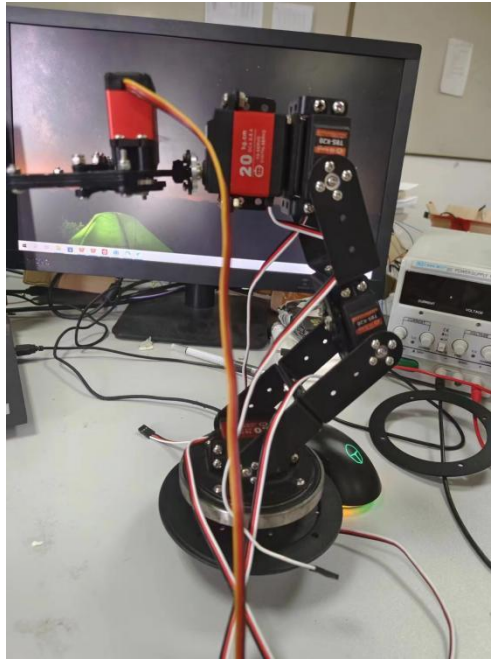
In order to speed up the rescue efficiency and ensure the safety of rescue workers, especially in some complex road conditions, we designed this six-legged search and rescue robot, which can be remotely controlled to survey the surrounding situation in real time. The robot receives data by Bluetooth, carries a robotic arm, camera, and other sensor modules, which can be remotely controlled to walk on complex ground conditions and send back environmental conditions in real time, providing environmental data for rescue. The control is simple, and because it carries a robotic arm, it can assist rescue workers to grab and transport items. Or remove the debris. In addition, the robot also contains a voice module, which makes the human-computer interaction more simple, saves a lot of operation time, and facilitates the rescue.

In addition, the search and rescue robot is also equipped with programming functions, which expands the application scenarios of the robot. Due to its hardware facilities, it can have functions such as handling and operating precision instruments in industry. When working at home, it can be used to monitor the family in real time and change the home environment to a certain extent.

After system design and debugging, the robot can meet the expected requirements, with the passage of time, the robot can also be constantly improved, can better serve the industry.



机器人主体实拍图



机械臂实拍图

目录

一.简介 （Introduction）	1
1.1 设计目的	1
1.2 应用领域	1
1.3 主要技术特点	2
1.4 主要创新点	3
二. 架构设计 （Organization）	4
2.1 系统架构简介	4
2.2 各功能模块设计	4
三. 控制电路 （Controller）	6
3.1 控制电路简介	6
3.2 信息采集层介绍	6
3.3 数据处理层介绍	6
3.4 通信层介绍	6
四. 传感系统 （Sensor）	10
4.1 LDX-218 数字双轴舵机	10
4.2 DX-BT04-E02 蓝牙模块	11

4.3 YL-38 火焰传感器模块-----	11
4.4 HC-SR501 人体红外传感器模块-----	12
4.5 OV5640 摄像头模块-----	13
4.6 ASPRO 语音识别模块-----	15
五. 机械结构 (Structure) -----	16
5.1 整体设计-----	16
5.2 机械臂结构-----	16
5.3 六足机器人足部结构-----	18
5.4 电机动力驱动-----	19
六. 算法系统 (Algorithm) -----	21
6.1 六足机器人波动步态-----	21
6.2 机械臂运动学算法-----	22
6.3 OV5640 摄像头驱动-----	25
6.4 数字舵机 LDX-218 驱动模块-----	27
6.5 uart 通信协议-----	28
6.6 基于卡尔曼滤波的传感器融合算法-----	29
七. 系统整合与调试 (Integration & Test) -----	31
7.1 机器臂功能验证-----	31
7.2 行走功能验证-----	32
7.3 火焰检测功能验证-----	33
7.4 温湿度及光照功能验证-----	33
7.5 摄像头功能验证-----	33
7.6 语音识别功能验证-----	34
八. 未来发展与提升 (Future Work) -----	35
九. 总结 (Conclusion) -----	36
十. 参考资料 (References) -----	37

一、简介（Introduction）

1.1 设计目的

近几年自然灾害频繁发生，自然灾害过后，救援人员往往面对的是一片废墟，传统的智能救援小车往往无法在这种复杂的路面上行驶，以至于救援人员无法勘察废墟地下的情况，这对救援行动造成了巨大的影响，延误了救援时间，增大了自然灾害所带来的损失，且有些受灾地形复杂，作业环境危险，对搜救人员的生命健康安全更是一大威胁，且更可能会由于救援不及时对受困者造成进一步的伤害。

为了加快救援效率，保障救援人员的安全，特别是一些复杂的路面情况下，我们设计了这块可远程操控实时勘察周围情况的六足搜救机器人。这款机器人由蓝牙接受数据，携带机械臂，摄像头，和其他传感器模块，可以远程操控其在复杂的地面情况上行走，并且实时传回环境情况，提供救援所用的环境数据，操控简单，并且，由于携带一个机械臂，它可以协助救援人员夹取并运输物品. 或者搬开废墟。并且，该机器人还含有语音模块，使人机交互更加简单，节省了许多操作时间，方便救援的展开。

此外，本搜救机器人还搭载了编程功能，拓展了该机器人的应用场景，由于它的硬件设施，工业上它可以拥有搬运，操作精密仪器等功能，居家办公时，可以使用它实时监控家庭，对家里环境进行一定程度上的改变。

经过系统设计与调试，机器人可以达到预期的要求，随着时间的推移，机器人还可以不断的完善，可以更好的为行业服务。

1.2 应用领域

在自然界和人类社会中存在一些人类无法到达的地方和可能危及人类生命的特殊场合。如行星表面、灾难发生矿井、防灾救援和反恐斗争等，对这些危险环境进行不断地探索和研究，寻求一条解决问题的可行途径成为科学技术发展和人类社会进步的需要。地形不规则和崎岖不平是这些环境的共同特点。从而使轮式机器人和履带式机器人的应用受到限制。以往的研究表明轮式移动方式在相对平坦的地形上行驶时，具有相当的优势运动速度迅速、平稳，结构和控制也较简单，但在不平地面上行驶时，能耗将大大增加，而在松软地面或严重崎岖不平的

地形上，车轮的作用也将严重丧失移动效率大大降低。为了改善轮子对松软地面和不平地面的适应能力，履带式移动方式应运而生但履带式机器人在不平地面上的机动性仍然很差行驶时机身晃动严重。与轮式、履带式移动机器人相比在崎岖不平的路面步行机器人具有独特优越性能在这种背景下多足步行机器人的研究蓬勃发展起来。而仿生步行机器人的出现更加显示出步行机器人的优势。

我们基于 RobeiEDA 软件设计了这款多功能搜救机器人，这款机器人可用蓝牙进行远端操作，且通信距离远，操作简单，在一些危险场景下搜救人员可以操作机器人进行救援，大大增加了搜救的效率和被困人员生存几率。也可以自动寻找被困人员，发现幸存者时发出呼叫引导搜救人员到达幸存者方位。减轻了搜救人员的搜索压力和被困人员的生命安全风险。

1.3 主要技术特点

该六足机器人由 18 个 LDX-218 舵机组成腿部，6 个舵机组成机械臂，来实现主体的移动和夹取动作，搭载了 JQ866 模块语音识别模块和 ov5640 摄像头模块，实现智能交互和实时监控功能。

1. 六足机器人的步态：该六足机器人使用了波动步态，波动步态具有以下优点：

稳定性高：波动步态可以使机器人在行走时保持相对平稳的姿态，避免出现倾倒或者失衡的情况。

适应性强：波动步态可以适应不同的地形和工作环境，比如爬坡、越障、行走在不平坦的地面等。

负载能力强：六足机器人采用波动步态时，可以通过调整步长和步频来适应不同的负载情况，具有较强的负载能力。

灵活性高：波动步态可以根据需要进行调整，例如可以改变步长和步频来适应不同的速度要求。

可编程性好：波动步态可以通过编程来实现，可以根据不同的需求进行优化和改进。

实现方法：在 FPGA 上完成波动步态的我们构想了以下的方法：

首先，我们将六足机器人向前前进一步设定了一个为期 18 秒的计时器，将每一秒设定为改变机器人的一次状态。

其次，对于每个状态下的机器人的各个舵机配置参数使其组合成。

2. JQ866 模块语音识别模块

3. ov5640 摄像头

1.4 主要创新点

（1）机器人采用了蓝牙控制和语音控制的方式，使机器人的控制更加容易，节省了操控时间，大大提高了救援效率。

（2）机器人带有编程执行功能，用户可以通过自定义编程来编辑机器人的动作，使机器人可以适应更多的工作场景，增加了机器人的可重构性。

（3）机器人配备了机械臂，可以在实际的应用更加灵活的应对工作环境。协助救援人员夹取废墟，进行救援等工作。

（4）机器人配备 ov5640 摄像头，可以实时传回周边环境，协助救援人员了解废墟内的环境，做出救援决策。

二、架构设计（Organization）

2.1 系统架构简介

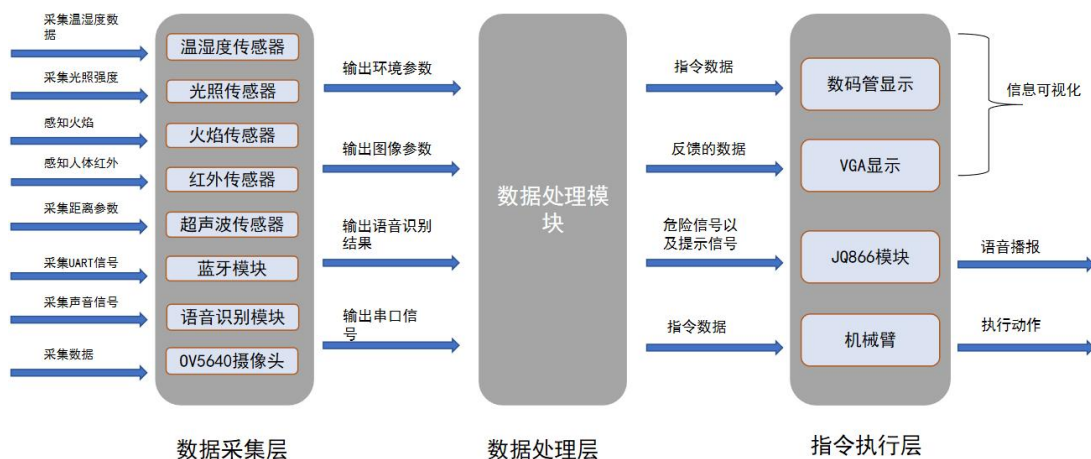


图 2.1 系统框图

如图 2.1 所示，该机器人是基于 Robei EDA 工具的可重构机器人系统，主控部分采用了正点原子新起点 V2 FPGA 开发板，结合摄像头，uart 串口通信，语音识别模块，蓝牙模块，温湿度传感模块，光照传感器模块，人体红外传感器模块，超声波传感器模块，火焰传感器模块，一同构成了主控部分的两大模块——外界通信层和数据处理层。主机的作用是通过蓝牙传输、语音识别等多种方式来进行机器人指令的生成，并通过 uart 串口通信协议传送到各个舵机等受控部位，以实现操控人员和机器人之间的远程交互。

2.2 各功能模块设计

各功能模块介绍及算法详见：六、算法系统。以下是简略介绍：

OV2640 摄像头模块负责实时监控机器人周边环境，传送至 FPGA 开发板中进行数据处理（主要通过二值化，降噪，滤波运算等运算），并最终在 VGA 屏幕上显示出来。

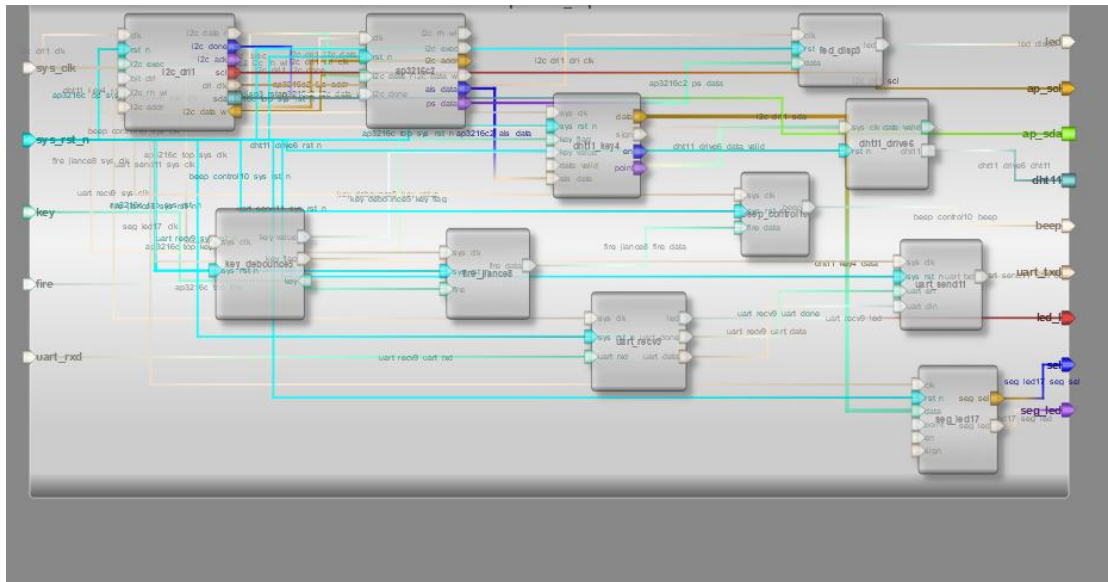
蓝牙模块主要负责通过 uart 串口通讯协议传输指令给 FPGA 开发板，使其进行解码，使 FPGA 开发板通过其获得的数据，以此对各个传感器模块进行驱动，保证执行的规律和秩序。

超声波传感器模块主要负责机器人的避障功能，它含有一个超声波发出端口

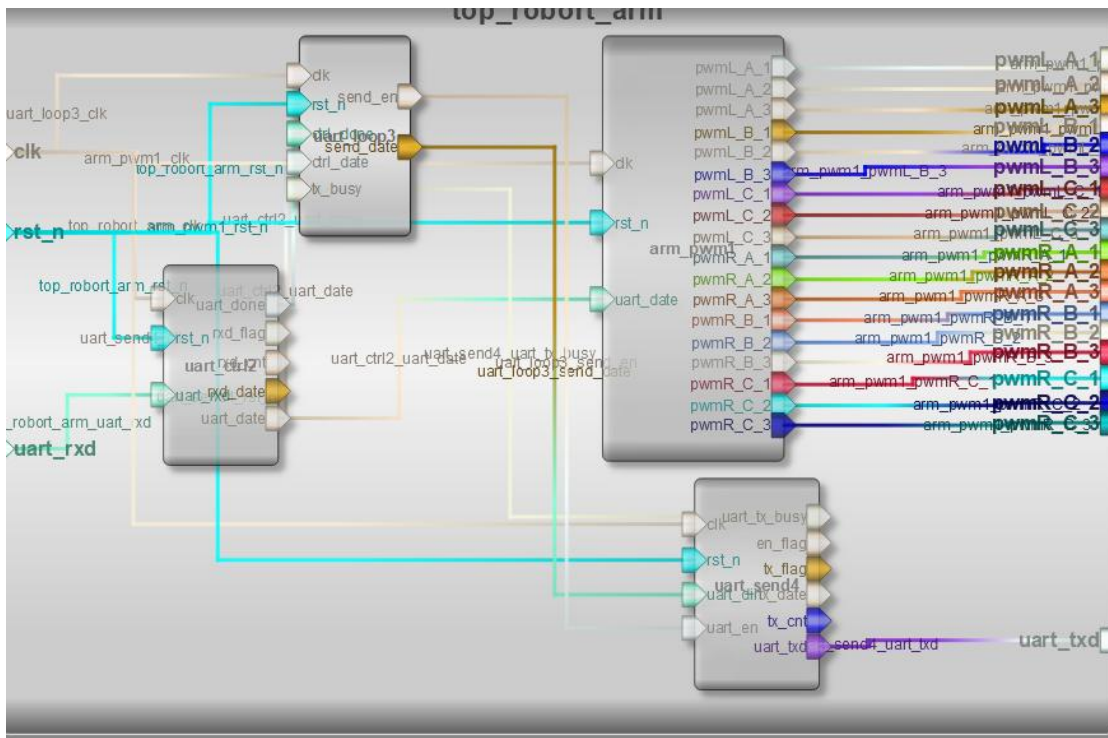
和超声波接受端口,通过实时检测超声波发出到传回的时间来表达前方是否有障碍物,并且将其数据通过 uart 串口通信协议传给 FPGA 开发板,在开发板设定一个最小阈值和最大阈值,当小于最小阈值时,机器人执行倒退程序,当大于最大阈值时,机器人退出倒退程序。

温湿度传感模块,光照传感器模块,火焰传感器模块三个模块整合成为环境感应模块,实时感受当前环境的情况,通过 uart 串口通信传给 FPGA 开发板进行数据处理,最终传给操控人员使其获得环境信息。

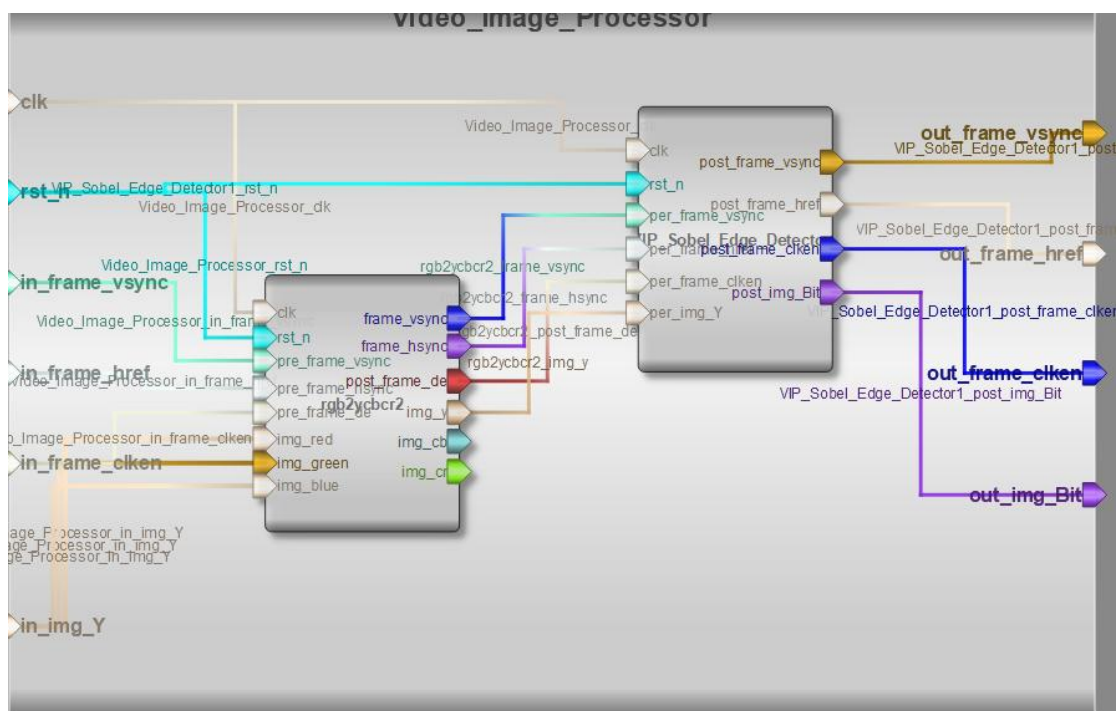
三、控制电路 （Controller）



基于 RobeiEDA 的模块模块设计 RTL 图（环境感知部分）



基于 RobeiEDA 的模块模块设计 RTL 图（数字舵机控制部分）



基于 RobeiEDA 的模块模块设计 RTL 图（摄像头识别部分）

3.1 控制电路简介

在设计初期，为了避免后期产生的模块功能之间的混杂与连线的混乱，我们根据机器人的数据采集处理以及响应过程，我们将整个系统的模块设计分成了三大层面进行开展，即①信息采集层，②数据融合处理层，③：通信层。这样做大大减少了模块间的混杂，且配合 RobeiEDA 工具，能更有效地进行工程的设计。

机器人将自动采集环境数据并进行融合处理，等待指令到来便对这些数据做出判断并执行相应的指令，并通过 VGA 显示屏以及 lcd 显示屏将机器人的环境数据显示给用户，从而让用户通过移动端输入指令机器人，远程操控机器人进行搜救工作或自动化任务。为了便于机器人的大规模使用以及控制，我们的机器人可以实现一台主机控制多个机器人，当然，一个机器人也可以受到多个用户的控制。此外，机器人还具有自主执行任务的能力，即在无人控制的状态下，用户进入编程模式，自定义机器人工作命令，机器人便会根据程序指令自动执行任务。我们采用的是分模块的设计，厂家只需更改数据融合处理层的指令触发条件，就可以

完成对机器人功能性的重构，大大的拓展了机器人的使用范围。

3.2 信息采集层介绍

整个系统的控制端，其作用就是实现人机交互以及向用户传达信息和作为从机的控制端。主机的信息采用用户的指纹信息，实现主机的安全验证功能。由于我们搭载了语音控制功能，所以语音识别模块用于采集用户的语音命令，从而控制机器人执行相应指令，机器人控制面板上搭载了一个矩阵键盘，用于实现对系统的自定义以及执行命令。除此之外，机器人搭载了一个 OV5640 摄像头，用于采集周围的环境，用户可以通过蓝牙模块，控制机器人执行任务。

机器人的信息采集层主要包括用于环境信息采集的传感器，以及摄像头，语音识别等。机器人搭载的环境传感器（温湿度，光照等）采集到的数据都将经过可视化处理，显示在主机的 LCD 屏和 VGA 显示器上。

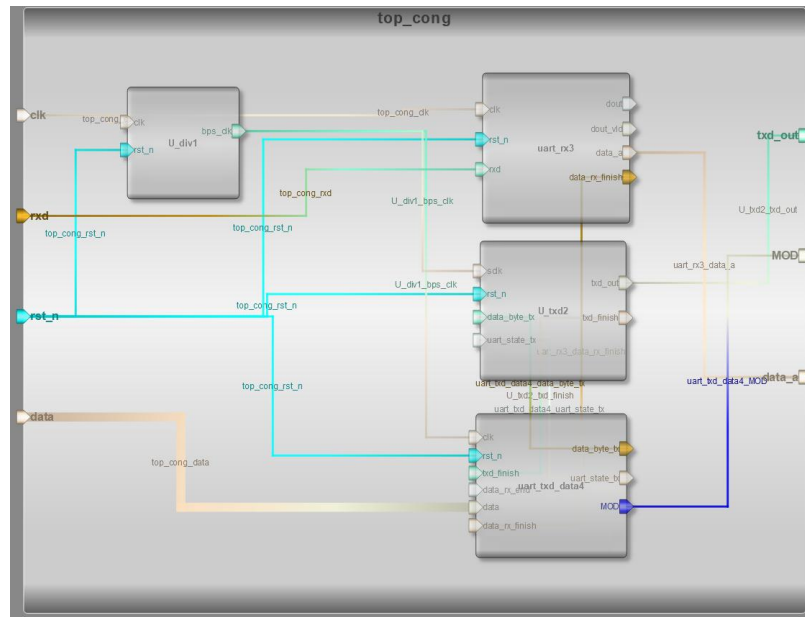
3.3 数据处理层介绍

机器人在接收到反馈的数据和用户的指令后，需要进行对数据进行运算，从而进行下一步操作。在环境感知采集到数据后，经过计算，将会得到环境信息，然后在经过蓝牙模块生成 CMD 模块，将生成的指令通过通讯模块传递给从机，便实现了手势控制功能。语音识别模块依靠的使 uart 通信协议，在接收到识别指令后 CMD 模块进行指令生成，从而实现语音控制。

机器人的数据处理主要是处理传感器采集到的数据，以及对用户发送过来的指令进行解码，驱动机械臂和六足进行工作。

3.4 通信层介绍

用户与机器人之间的实时通讯是使机器人正常工作的一个重要保障，为保证用户与机器人之间通讯的稳定性，我们基于蓝牙模块，自创了一套应答式通讯系统，通过 uart 协议进行数据传输。



蓝牙通讯控制模块

DATA 接口接入我们需要传输的数据，其中数据中包括数据标识符和停止位，标识符的引入是为了使对方把收到的数据准确的存储在对应的缓存中，而停止为位的引入确保了通讯的有序性。就类似于两个人进行交流，停止位的引入就是防止交流过程中说话被打断，另一方只有在对方说话结束时才会做出回应，避免了通讯的混杂。而当主机或从机任意一方接收到数据后，都会进行回应，即一呼即应。确保任意一方的数据发送，都可以唤醒通讯系统，即使通信由于不可抗拒因素而中断后，用户可以通过移动端按下“掉线重连”按键后，可以快速的使用户与机器人之间的通讯恢复，使机器人工作得以继续。

四、传感系统（Sensor）

4.1 LDX-218 数字双轴舵机



图 4.1 LDX-218 数字双轴舵机

LDX-218 数字舵机是一种高性能的舵机，采用了数字信号控制技术和高精度的电机控制系统，能够实现快速、准确、精细的控制。该舵机具有高速和高扭矩的特点，能够适应多种场合的控制需求。

LDX-218 数字舵机采用了高精度的传感器和控制芯片，能够实现高稳定性的运动控制，同时具有低噪音、低功耗等优点。该舵机采用了金属齿轮和高强度的机壳，具有很高的耐久性和可靠性，适用于各种工业和机器人应用。

LDX-218 数字舵机的控制原理主要是通过输入控制信号来控制舵机的转动角度和速度。该舵机采用了数字信号控制技术，通常使用 PWM 信号作为控制信号，控制信号的周期为 20ms，脉宽为 0.5~2.5ms，其中 0.5ms 表示左极限，1.5ms 表示中间位置，2.5ms 表示右极限。当控制信号的脉宽发生变化时，LDX-218 数字舵机会根据脉宽的大小和方向来确定舵机的转动角度和速度。具体来说，当脉宽为 1.5ms 时，舵机处于中间位置，不转动；当脉宽小于 1.5ms 时，舵机向左转动，转动角度的大小和脉宽的差值成正比；当脉宽大于 1.5ms 时，舵机向右转动，转动角度的大小和脉宽的差值成负比。除了 PWM 信号外，LDX-218 数字舵机还支持串口通信和 CAN 总线控制方式。在串口通信方式下，可以通过发送控制指令来实现舵机的转动控制；在 CAN 总线控制方式下，可以通过总线来实现多个舵机的集中控制。

接线方式：

白	—————	信号线
黑（中）	—————	VCC
黑（边）	—————	GND

4.2 DX-BT04-E02 蓝牙模块

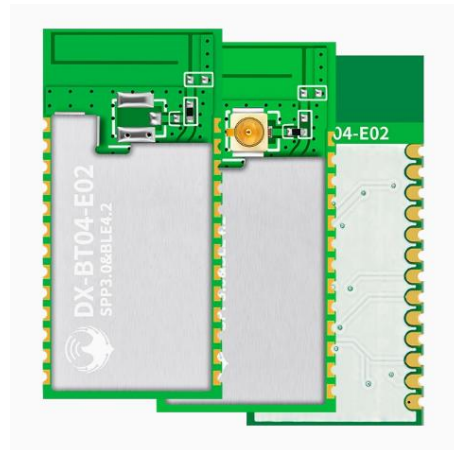


图 4.2 DX-BT04-E02 蓝牙模块

DX-BT04-E02 蓝牙模块含有 4 个端口，分别是 VCC 接口，GND 接口，RXD 接口，TXD 接口。VCC 接口连接电源正极，GND 接口连接电源负极，RXD 接口是串口数据输入，TXD 是串口数据输出。DX-BT04-E02 蓝牙模块工作在 2.4G 无线频段，使用板载天线，当接受到连接设备发来的数据时，使用 UART 串口通信协议通过 TXD 端口将数据传输给 FPGA 开发板，需要注意的是，传入的数据是 ascii 码值，例如当接受到数据“1”时，FPGA 开发板实际上是 ascii 码值“49”。

4.3 YL-38 火焰传感器模块

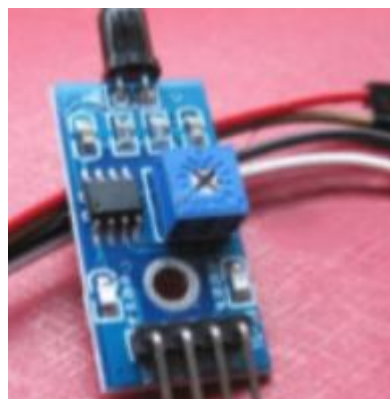


图 4.3 YL-38 火焰传感器模块

YL-38 火焰传感器模块可以检测火焰或波长在 760 纳米--1100 纳米范围内的光源，他含有 2 种输出形式分别是模拟量电压输出和数字开关量输出（0 和 1）它含有 VCC，GND，DO，AO 四个接口，分别是外接正极，外接地级，数字量输出接口和模拟量输出接口。

将 DO 接口接入 FPGA 开发板 io 口上，可以通过来检测接口的高低电平，并且通过 uart 通信协议传入 FPGA 开发板以此来检测环境火焰光谱。具体现象如下：环境火焰光谱超过设定阈值时，串口不断发送 01，环境火焰光谱未超过设定阈值时，串口不发送数据。

4.4 HC-SR501 人体红外传感器模块



图 4.4 HC-SR501 人体红外传感器模块

HC-SR501 人体红外传感器模块采用双元探头，探头的窗口为长方形，双元（A 元 B 元）位于较长方向的两端，当人体从左到右或从右到左走过时，红外光谱到达双元的时间、距离有差值，差值越大，感应越灵敏，当人体从正面走向探头或从上到下或从下到上方向走过时，双元检测不到红外光谱距离的变化，无差值，因此感应不灵敏或不工作；所以安装感应器时应使探头双元的方向与人体活动最多的方向尽量相平行，保证人体经过时先后被探头双元所感应。为了增加感应角度范围，本模块采用圆形透镜，也使得探头四面都感应，但左右两侧仍然比上下两个方向感应范围大、灵敏度强。当检测到人体时，会通过其 OUT 引脚输出数据给 FPGA 开发板。

4.5 OV5640 摄像头模块

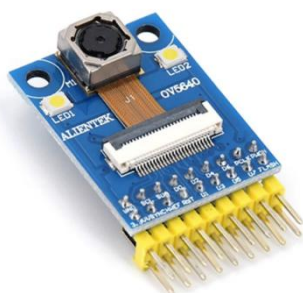


图 4.5 OV5640 摄像头模块

机器人使用了一个 OV5640 摄像头模块。OV5640 摄像头图像输出接口支持 DVP 和 MIPI 两种接口。它的整体接口如下：CMOS_SCL 和 CMOS_SDA：实际上就是 SCCB 接口的 SIO_C 和 SIO_D，由于 SCCB 和 IIC 接口十分相似，只有一个位置的细微差别，所以经常就会叫做 SCL 和 SDA。

D0-D7：图像数据输出引脚，一共 8 位，从框图中可以看出，其实是有 10 位的，查看摄像头的外部电路原理图得知，10 位中的低两位没有引出来。

CMOS_PCLK：从框图中可以看出，这个时钟是摄像头输出的，用于和 D0-D7 以及 VSYNC 同步，也就是说外部采集数据是以 PCLK 为标准时钟的。

CMOS_XCLK：从框图中可以看出，这个时钟是外部输入的，用于为摄像头提供时钟。

CMOS_VSYNC：摄像头输出信号，在每一帧图像输出开始之前，都会拉高一定的时间，用于帧同步。

CMOS_HREF：摄像头输出信号，拉高，表示 D0-D7 输出数据有效。

CMOS_RESET：复位信号，默认为高电平，拉低时间持续 1ms 以上进行复位，清除 OV5640 摄像头内部寄存器的所有值为默认值。

CMOS_PWDN：掉电使能信号，外部输入，高电平有效，正常工作是，应设置为低电平。

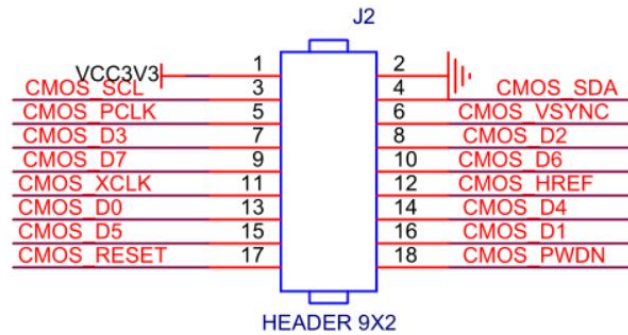
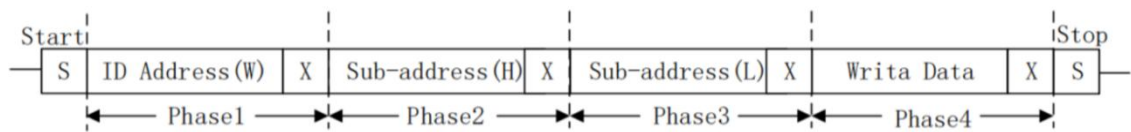


图 4. 60V5640 摄像头整体接口图

OV5640 摄像头通过 SCCB 总线控制，它的写传输协议如下图所示



ov5640 关键参数和地址如下所示：

开窗：摄像头物理像素工作区域：水平 0-2591，竖直 0-1943，地址 0x3800 到 0x3807。两个地址标志一个值。

平移：将开窗平移，在不移动摄像头的前提下改变拍摄位置。地址 0x3910 到 0x3813。这里只的数据代表的是偏移量。偏移量的大小值是基于 ISP 输入窗口的起始地址的增量。

输出窗口的大小：最终输出的像素大小。地址 0x3808 到 0x380B。

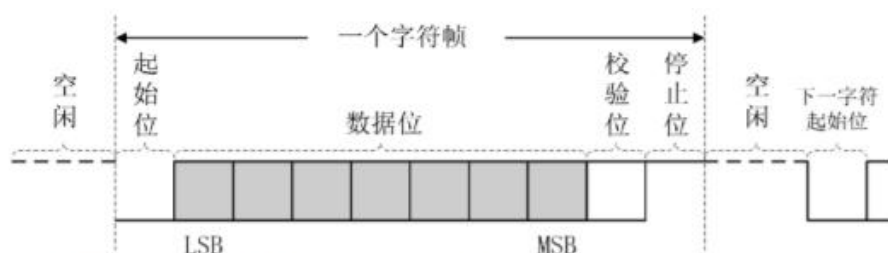
4.6 ASPRO 语音识别模块



图 4.7 ASPRO 语音识别模块实物图

该模块是针对低成本离线语音应用方案开发的一款通用、便携、低功耗高性能的语音识别芯片，采用了第三代语音识别技术，能支持 DNN\TDNN\RNN 等神经网络及卷积运算，支持语音识别、声纹识别、语音增强、语音检测等功能，具备强劲的回声消除和环境噪声抑制能力，语音识别效果优于其它语音芯片。

该模块通过 uart 串口通信协议连接 FPGA 开发板，当接受到外来数据数据时，经过模块内的数据处理，传输一帧数据给 FPGA 开发板，具体传输方法如下图 4.8。



起始位：先发出一个逻辑“0”信号，表示传输字符的开始。

数据位：可以是5~8位逻辑“0”或“1”。如 ASCII 码（7位），扩展 BCD 码（8位）

校验位：数据位加上这一位后，使得“1”的位数应为偶数(偶校验)或奇数(奇校验)

停止位：它是一个字符数据的结束标志。可以是1位、1.5位、2位的高电平。

空闲位：处于逻辑“1”状态，表示当前线路上没有资料传送。

图 4.8 传输逻辑

五、机械结构（Structure）

5.1 整体设计

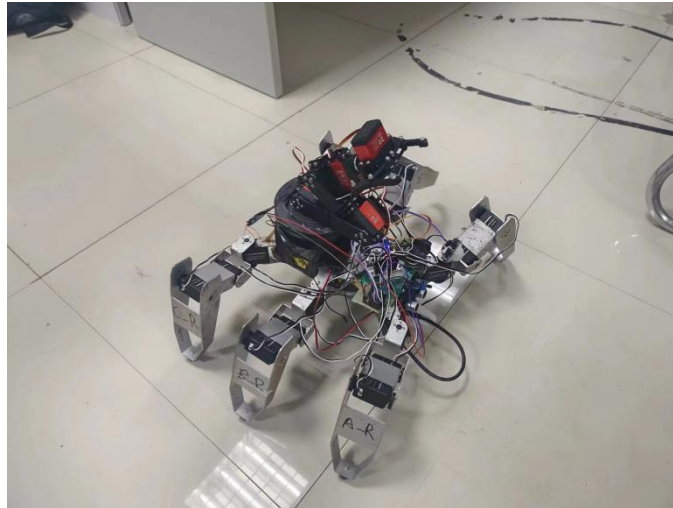


图 5.1 机器人整体实物图

如图 5.1 所示，我们设计的机器人足部采用了 18 个舵机构成 6 条腿，背部安装一个六自由度的机械臂，FPGA 开发板安装在机器人中部凹槽，由蓝牙模块传输对机器人动力驱动的指令，其中摄像头模块和超声波模块安装在机器人头部，便于实时监控机器人前方环境情况，并且机器人配备了火焰传感器模块和人体红外传感模块以便加大对环境的监控力度，机器人还搭载了语音播报模块，以便智能化操控和人机交互。

5.2 机械臂结构

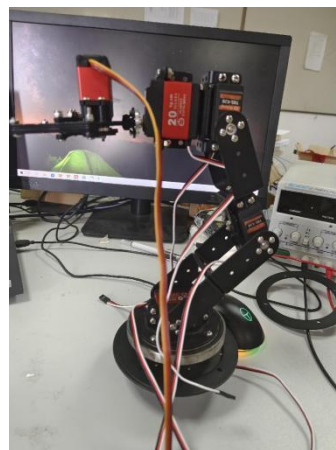


图 5.2 机械臂实物图



图 5.3 机械臂结构图

如上图所示，我们给六足机器人配备了一个 6 自由度的 pwm 舵机机械臂，其中含有一个机械爪，可以进行物体抓取动作，整体机械臂是由 6 个舵机完成的其中五个舵机分别控制一个自由度，剩下一个舵机控制机械爪的开合，以这种方式完成机械臂的动作。



图 5.4 LDX-218 舵机

图 5.4 为 LDX-218 舵机，LDX-218 数字舵机的控制原理主要是通过输入控制信号来控制舵机的转动角度和速度。该舵机采用了数字信号控制技术，通常使用 PWM 信号作为控制信号，控制信号的周期为 20ms，脉宽为 0.5~2.5ms，其中 0.5ms 表示左极限，1.5ms 表示中间位置，2.5ms 表示右极限。

当控制信号的脉宽发生变化时，LDX-218 数字舵机会根据脉宽的大小和方向来确定舵机的转动角度和速度。具体来说，当脉宽为 1.5ms 时，舵机处于中间位

置，不转动；当脉宽小于 1.5ms 时，舵机向左转动，转动角度的大小和脉宽的差值成正比；当脉宽大于 1.5ms 时，舵机向右转动，转动角度的大小和脉宽的差值成负比。

除了 PWM 信号外，LDX-218 数字舵机还支持串口通信和 CAN 总线控制方式。在串口通信方式下，可以通过发送控制指令来实现舵机的转动控制；在 CAN 总线控制方式下，可以通过总线来实现多个舵机的集中控制。

5.3 六足机器人足部结构

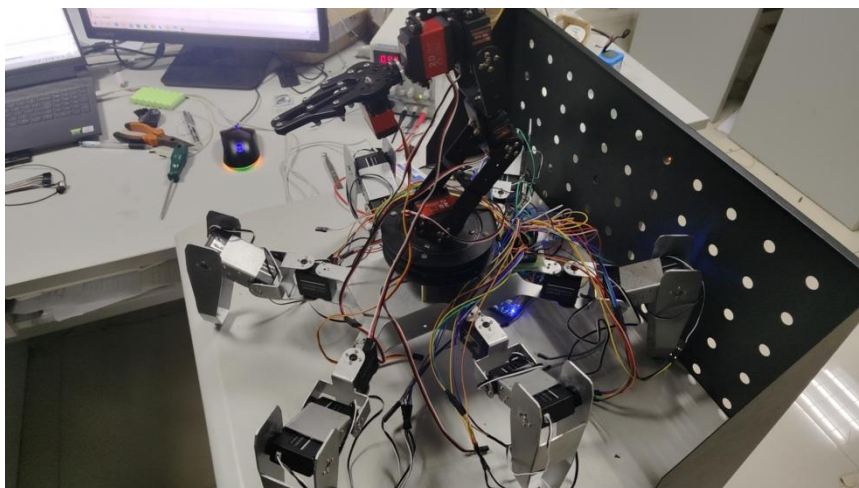


图 5.4 六足机器人足部实物图

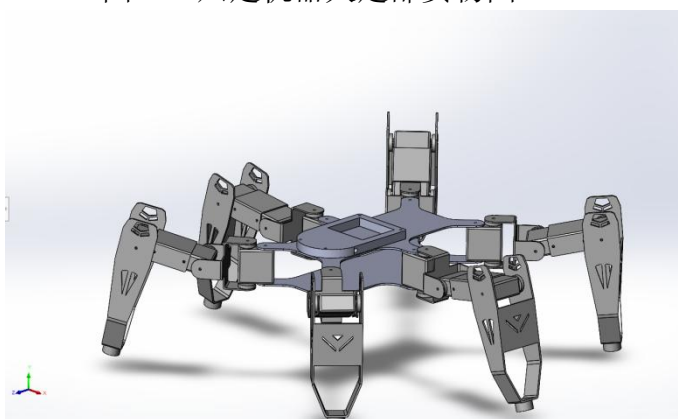


图 5.5 六足机器人足部结构图

该六足机器人采取了仿生足部结构，其结构特点主要包括以下几个方面：

1. 具有六条腿：六足机器人的最大特点就是具有六条腿，每条腿上都有多个关节，可以实现多自由度的运动，可以适应不同的地形和环境。
2. 仿生设计：六足机器人的腿部结构和运动方式都是模仿动物的运动方式设计的，例如昆虫和蜘蛛等，其运动方式具有高效性和适应性，可以在不规则地形和狭窄空间中自如行动。
3. 轻量化：六足机器人的结构设计通常比较轻量化，采用高强度的材料制造，例如碳纤维等，可以提高机器人的运动速度和灵敏度。
4. 智能控制：六足机器人通常具有智能控制系统，可以通过传感器和计算机视觉等技术获取环境信息，并进行自主导航和路径规划，实现自主控制和自适应运动。
5. 多功能性：六足机器人通常具有多种功能，例如搜救、勘察、探测等，可以在复杂和危险的环境中完成各种任务。

5.4 电机动力驱动

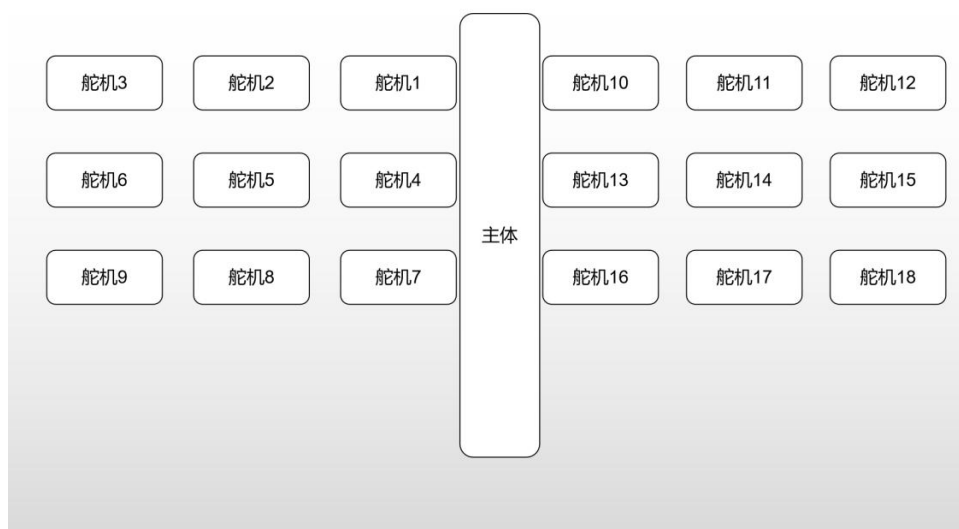
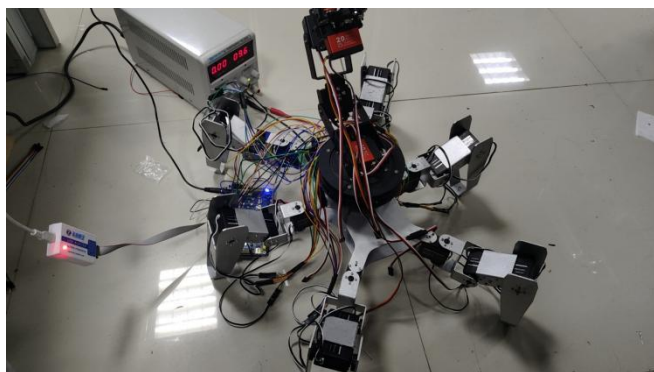


图 5.6 电机动力驱动分图

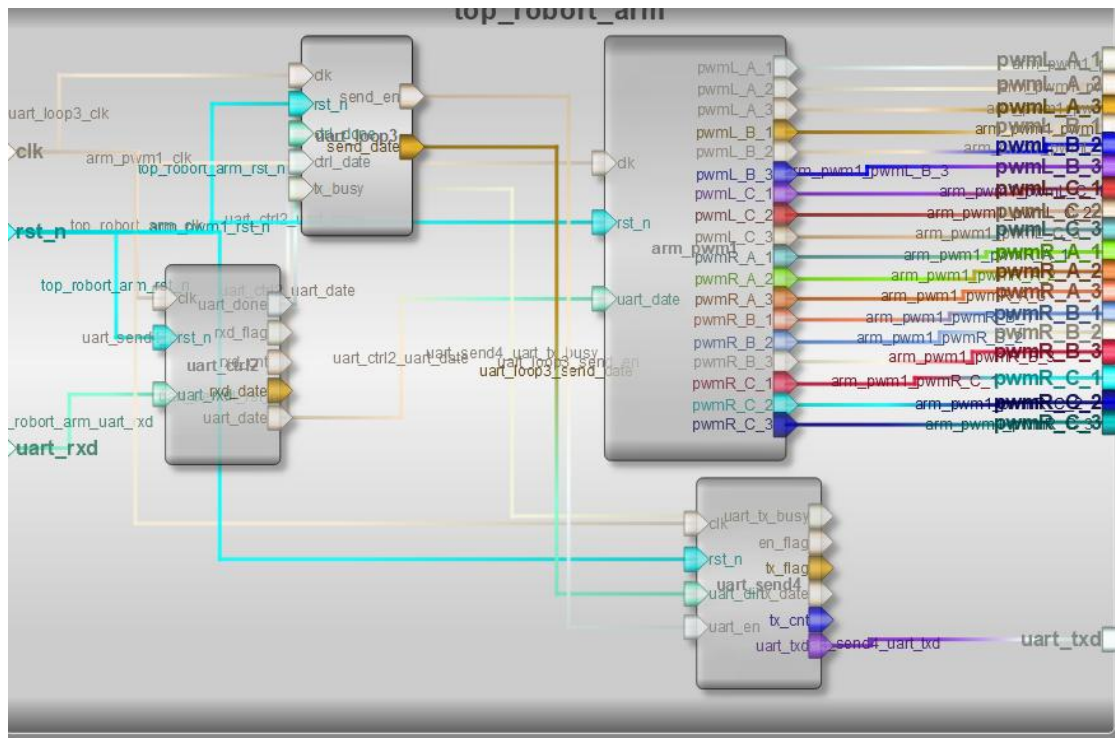


图 5.7 Robei 电机动力驱动图

如图 5.6 所示，机器人的动力驱动部分采用了 18 个数字舵机，18 个数字舵机分为 6 组，每组由 3 个数字舵机构成，使用 FPGA 输出 18 路 PWM 波对舵机进行角度操控，从而实现六足机器人的波动步态下的前进，后退，转向，以及避障等功能。每个舵机的供电电压均为 8.4v。

六、算法系统 (Algorithm)

6.1 六足机器人波动步态

六足机器人的波动步态 (ripple gait) 是指机器人的六条腿按照一定的规律交替地移动, 从而实现机器人的运动。波动步态是一种比较简单的步态, 适用于在平坦地形和低速运动时使用。以下是六足机器人波动步态的算法:

1. 步态规律

六足机器人的波动步态可以分为三个阶段: 抬腿、支撑和落腿。每个阶段的时间长度相等, 一般为 $1/3$ 步长。在抬腿阶段, 机器人的六条腿依次抬起, 其它腿保持地面支撑。在支撑阶段, 机器人的其中五条腿保持地面支撑, 另外一条腿则向前移动, 准备进入下一个抬腿阶段。在落腿阶段, 机器人的抬起腿着地, 下一顺序腿则进入准备抬起的状态。

2. 步态控制

六足机器人波动步态的控制需要根据机器人当前的状态来确定各个腿的运动状态。具体来说, 需要确定每个腿的抬腿高度、前进距离和角度等参数。

以下是六足机器人波动步态算法的一些公式:

1. 步长 (stride length): 机器人在一次步态中前进的距离。

$$\text{stride length} = (\text{swing height} + \text{body height}) \times \tan(60^\circ / 2)$$

其中, swing height 是抬腿高度, body height 是机器人身体高度, 60° 是机器人的腿部张角。

2. 抬腿高度 (swing height): 机器人在抬腿阶段中腿部抬起的高度。

$$\text{swing height} = 0.25 \times \text{body height}$$

其中, body height 为机器人身体高度。

3. 支撑时间 (stance time): 机器人在支撑阶段中腿部与地面接触的时间。

$$\text{stance time} = 1/3 \times \text{period}$$

其中, period 为步态周期, 即机器人完成一个步态所需的时间。

4. 抬腿时间 (swing time): 机器人在抬腿阶段中腿部离开地面的时间。

$$\text{swing time} = 1/3 \times \text{period}$$

其中, period 为步态周期, 即机器人完成一个步态所需的时间。

5. 角速度控制 (angular velocity control)：机器人通过角速度控制来调整腿部的运动速度和方向。

$$\text{angular velocity} = (2 \times \text{stridelength}) / (\text{stancetime} \times 3)$$

其中, stridelength 为步长, stancetime 为支撑时间, 3 为机器人的腿数。

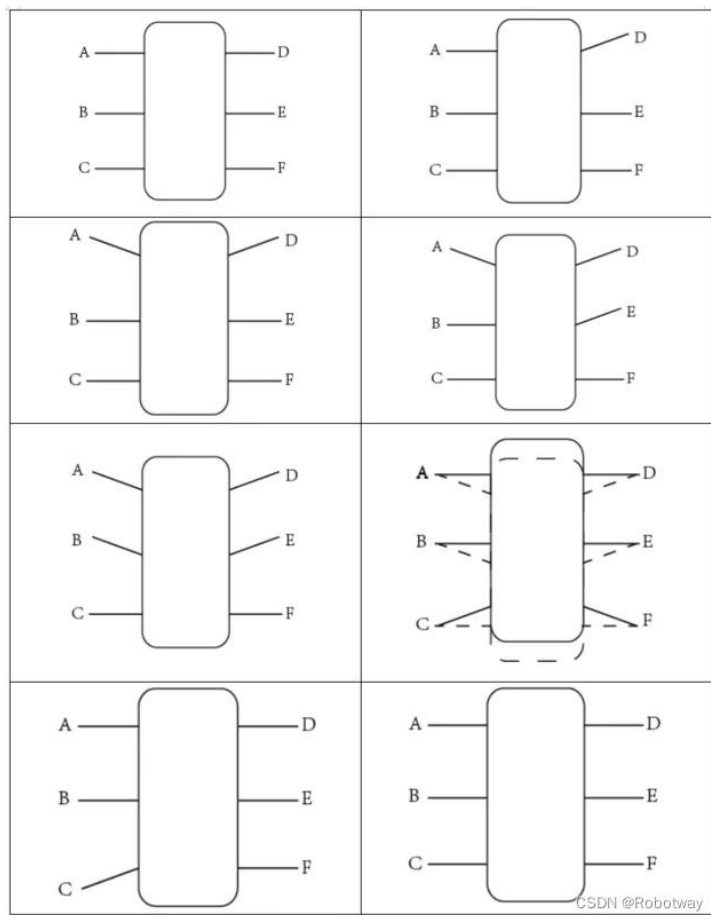


图 6.1 波动步态示意图

具体步态效果见视频演示效果。

6.2 机械臂运动学算法

机械臂运动学算法是指根据机械臂的结构和运动规律, 计算机械臂末端执行器的位置和姿态的过程。机械臂运动学算法主要分为正运动学和逆运动学两种。

1. 正运动学 (Forward Kinematics)

正运动学是指根据机械臂各个关节的角度和机械臂的 DH 参数等信息, 计算机械臂末端执行器的位置和姿态的过程。正运动学可以用矩阵变换法来实现。

机械臂末端执行器的位置和姿态可以表示为齐次变换矩阵 T ，其计算公式为：

$$T = A_1 * A_2 * A_3 * \dots * A_n$$

其中， A_i 为机械臂的转换矩阵， n 为机械臂的关节数

逆运动学的求解方法有很多种，其中比较常用的是数值法。数值法是指通过迭代计算方式来求解机械臂各个关节的角度。数值法的优点是适用范围广，可以应用于各种机械臂结构和运动规律，但是求解速度较慢，精度也有一定的误差。

以下是机械臂运动学正逆解的一些公式：

1. 正运动学：

机械臂末端执行器的位置和姿态可以表示为齐次变换矩阵 T ，其计算公式为：

$$T = A_1 * A_2 * A_3 * \dots * A_n$$

其中， A_i 为机械臂的转换矩阵， n 为机械臂的关节数。

以 3 自由度（3-DOF）的平面机械臂为例，其转换矩阵可以表示为：

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中， θ_1 和 θ_2 为机械臂的关节角度， l_1 和 l_2 为机械臂的长度。

2. 逆运动学：

以 3 自由度（3-DOF）的平面机械臂为例，其逆运动学可以表示为：

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) - \text{atan2}(l_2 \sin \theta_2, l_1 + l_2 \cos \theta_2)$$

$$\theta_2 = \arccos((x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2) / (2 * l_1 * l_2))$$

$$\theta_3 = -\theta_1 - \theta_2$$

其中， x 和 y 为机械臂末端执行器的坐标， θ_1 、 θ_2 和 θ_3 为机械臂的关节角度， l_1 和 l_2 为机械臂的长度。

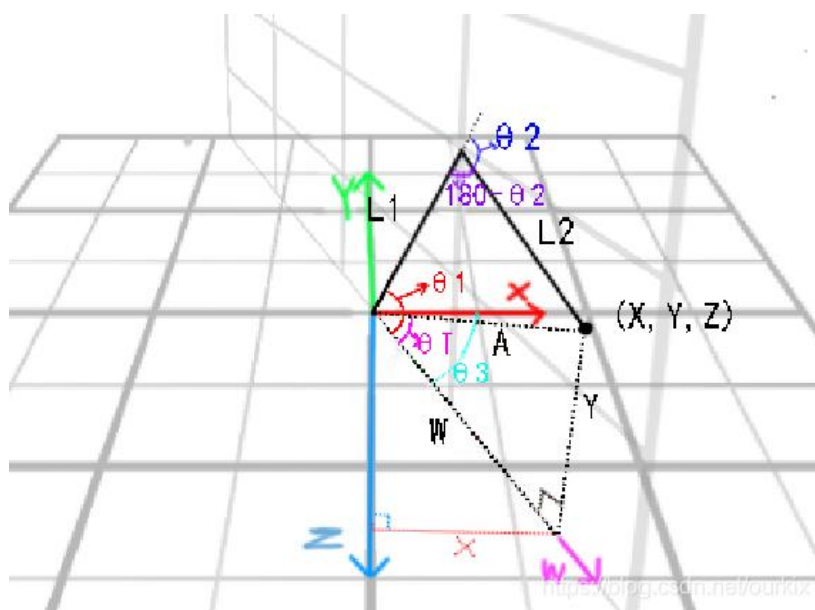


图 6.2 机械臂坐标建立示意图

6.3 OV5640 摄像头驱动

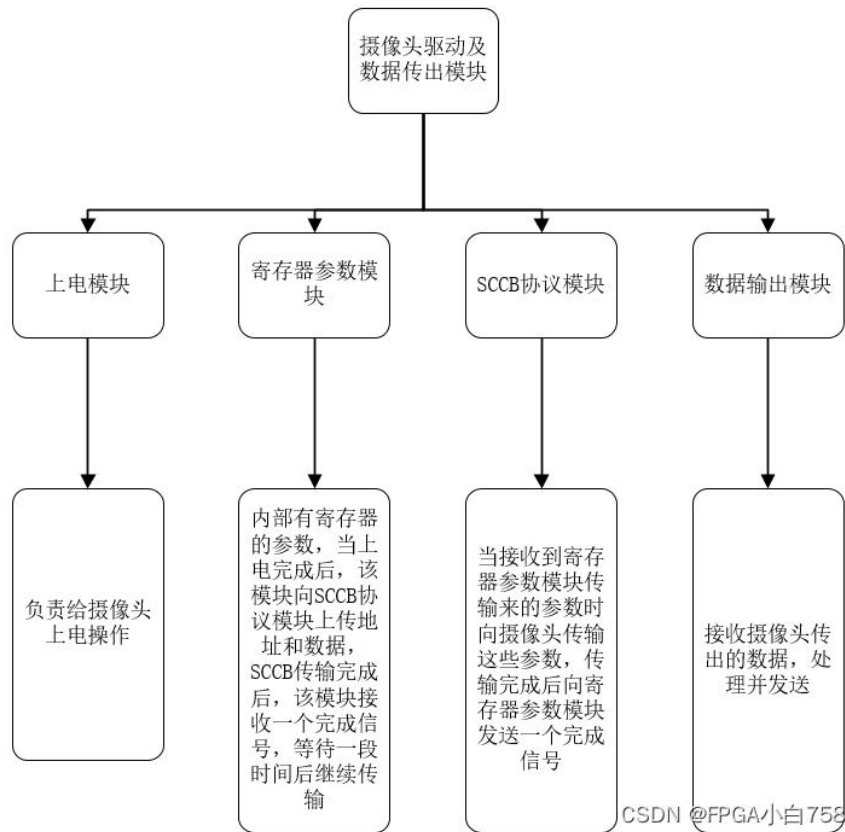


图 6.30V5640 摄像头模块规划图

该六足机器人配备 OV5640 摄像头用以实时监控周围环境，FPGA 首先将摄像头返回的 RGB 数据存储在 BRAM 中。并将其处理并显示在 VGA 屏幕上。

摄像头输出数据模式：

摄像头输出有四路信号：

PCLK: 像素时钟，其余三路信号与此时钟同步。

VSYNC: 帧同步信号，高电平有效

HREF: 数据有效信号

DATA[7:0]: 数据位，由于一次只能传八位数据，所以个像素需要两个时钟周期
为了方便，图中简化了部分。

摄像头输出数据模式图示如下：

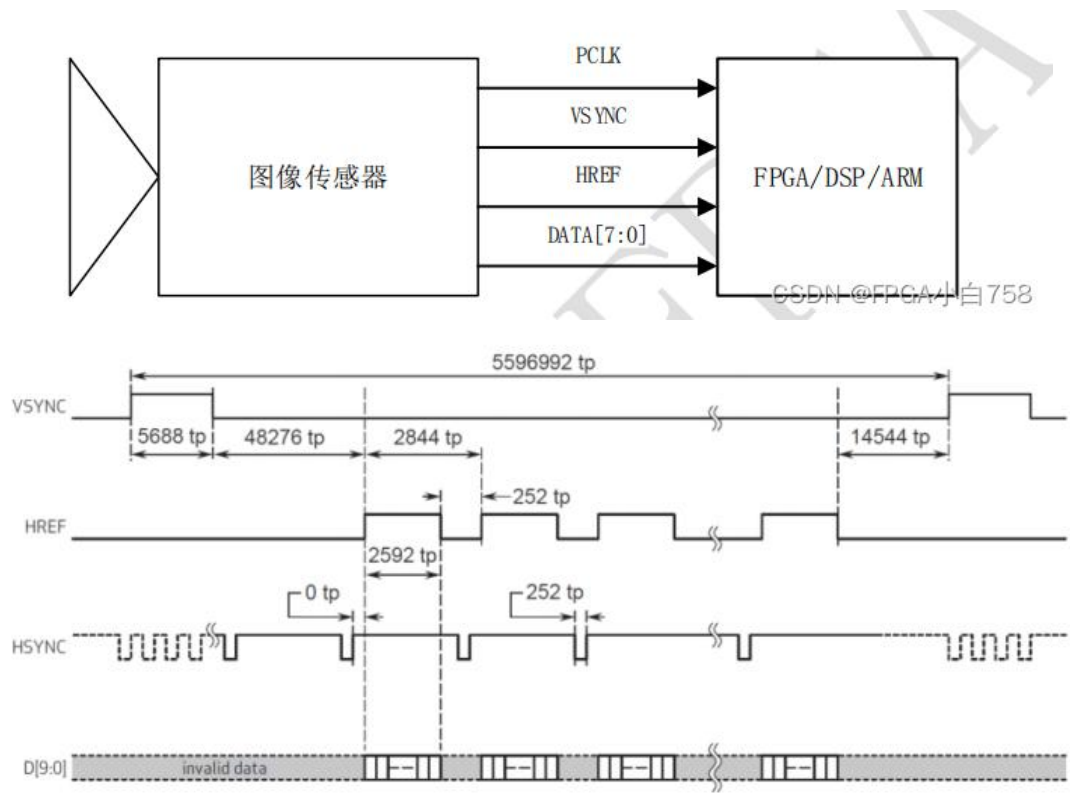
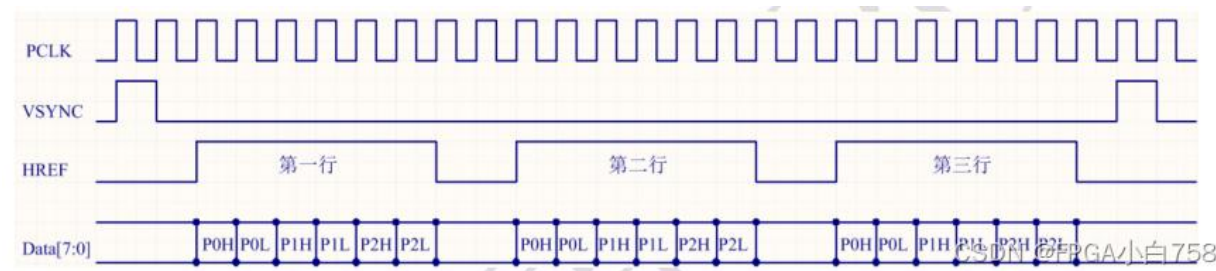


图 37.1.6 OV5640 QSXGA 帧时序

CSDN @q1594



图像处理部分：

图像处理例化了四个VIP (Video Image Processor) 模块，首先使RGB转YCbCr模块，该模块是色度空间的转化，前者为三原色色度空间，后者为亮度与色差。然后是 Sobel 边缘检测模块主要用作边缘检测用来运算图像亮度函数的灰度之近似值。最后腐蚀与膨胀算法模块会去除掉图像中的干扰，如图 6.4 所示。

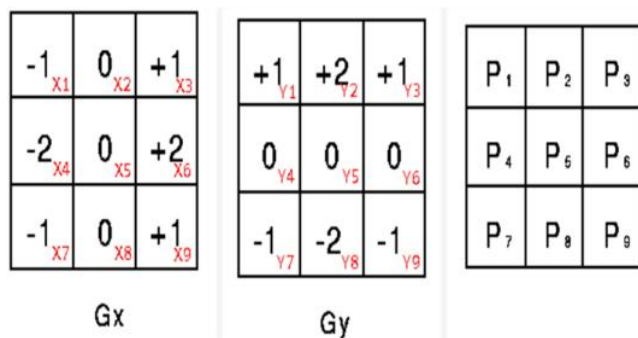
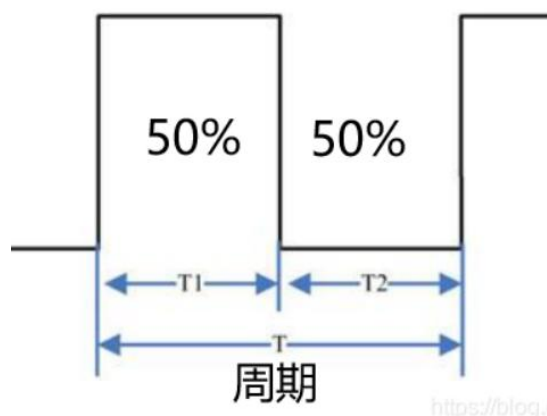


图 6.4

6.4 数字舵机 LDX-218 驱动模块

原理：舵机内部有一个基准电压，微处理器产生的 PWM 信号通过信号线进入舵机产生直流偏置电压，与舵机内部的基准电压作比较，获得电压差输出。电压差的正负输出到电机驱动芯片上，从而决定正反转。当舵机开始旋转的时候，舵机内部通过级联减速齿轮带动电位器旋转，使得电压差为零，电机停止转动。

简单来说，我们想操控一个舵机到达我们所要求的角度，需要在 20ms 周期内能输出一定时间的高电平给舵机信号接口和一定时间的低电平给舵机的信号接口。如图所示：



具体实现方法如下：

首先在 FPGA 内使用一个计时器，当它计时达到 20ms 时自动更新为初始状态，即重新计时。

其次，设定一个比较值，这个比较值可以更改。当计时器的计时数值小于该比较值时使得 FPGA 输出高电平到舵机信号接口，当大于该比较值时输出低电平

到舵机信号接口。以此只需要改变比较值便可以将舵机转动到我们所需要的角度。

其中对应关系如下：

0.5ms 高电平	-----	0 度
1.0ms 高电平	-----	45 度
1.5ms 高电平	-----	90 度
2.0ms 高电平	-----	135 度
2.5ms 高电平	-----	180 度

6.5 uart 通信协议

UART：通信异步收发器，串行、异步通信总线，两条数据线（收发），全双工（可以同时接收和发送）。

数据传送速率用波特率（bps）来表示，即每秒钟传送的二进制位数。例如数据传送速率为 120 字符/秒，而每一个字符为 10 位（1 个起始位，7 个数据位，1 个校验位，1 个结束位），则其传送的波特率为 $10 \times 120 = 1200$ 字符/秒 = 1200 波特。

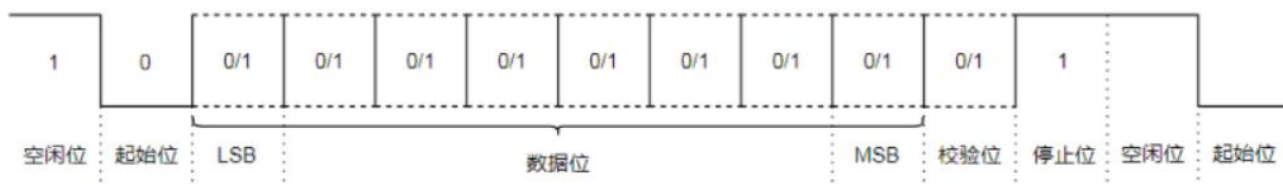
起始位：先发出一个逻辑”0”信号，表示传输字符的开始。

数据位：可以是 5~8 位逻辑”0”或”1”。如 ASCII 码（7 位），扩展 BCD 码（8 位）。小端传输

校验位：数据位加上这一位后，使得”1”的位数应为偶数(偶校验)或奇数(奇校验)

停止位：它是一个字符数据的结束标志。可以是 1 位、1.5 位、2 位的高电平。空闲位：处于逻辑”1”状态，表示当前线路上没有资料传送。

示意图如下：



6.6 基于卡尔曼滤波的传感器融合算法

基于卡尔曼滤波的传感器融合算法可以将多个传感器的信息进行融合,得到更准确、更完整的环境状态或目标信息。

卡尔曼滤波是一种线性高斯模型,适用于线性系统和高斯噪声的情况。基于卡尔曼滤波的传感器融合算法可以将多个传感器的信息,包括位置、速度、加速度等测量数据,通过状态空间模型来描述机器人的运动和测量过程,然后通过卡尔曼滤波将多个传感器的信息进行融合,得到更准确的机器人状态和环境地图。

基于卡尔曼滤波的传感器融合算法主要包括以下几个步骤:

1. 状态空间模型

状态空间模型是描述机器人的运动和测量过程的数学模型,包括状态方程和观测方程。状态方程描述机器人的运动规律,观测方程描述传感器的测量过程。

状态方程可以表示为:

$$x_k = A_{k-1} * x_{k-1} + B_{k-1} * u_{k-1} + w_{k-1}$$

其中, x_k 为机器人的状态, A_{k-1} 为状态转移矩阵, B_{k-1} 为控制转移矩阵, u_{k-1} 为控制输入, w_{k-1} 为过程噪声。

观测方程可以表示为:

$$z_k = H_k * x_k + v_k$$

其中, z_k 为传感器的测量值, H_k 为观测矩阵, v_k 为观测噪声。

2. 卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波器是用于将多个传感器的信息进行融合的算法,主要包括预测和更新两个步骤。

预测步骤根据状态空间模型预测机器人的状态,并计算预测误差协方差矩阵。

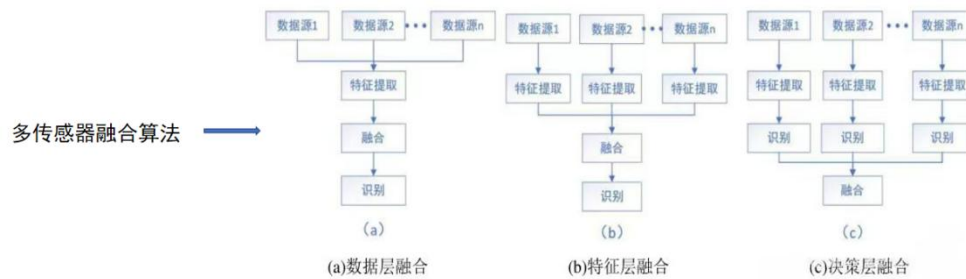
更新步骤根据传感器的测量值和观测方程，将预测的机器人状态进行修正，并计算修正后的误差协方差矩阵。

卡尔曼滤波器的优点是能够进行在线实时处理，适用于动态环境下的传感器融合问题，但是需要对机器人的运动和测量过程进行较准确的建模。

3. 建立测量模型

建立测量模型是将传感器的测量值和机器人状态进行对应，从而实现传感器融合的关键步骤。传感器的测量值需要根据机器人的状态进行转换和修正，从而得到更准确的机器人状态和环境地图。

示意图如下：

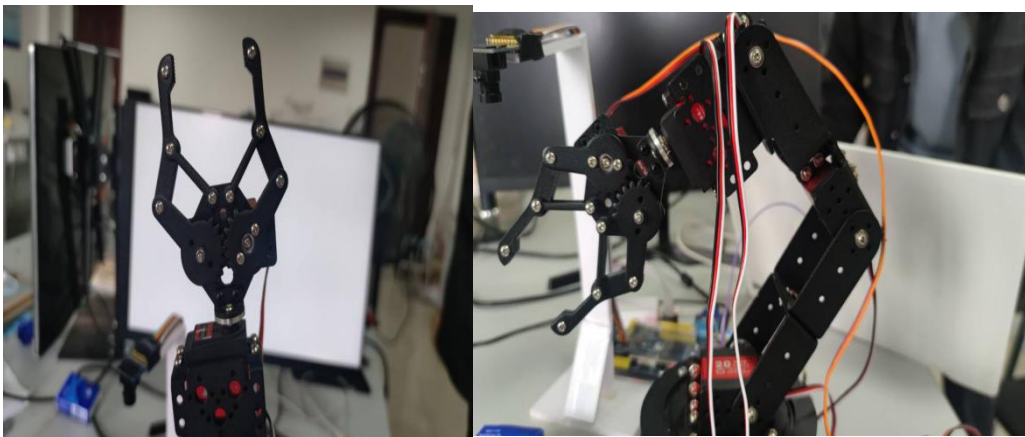


基于卡尔曼滤波的传感器融合算法可以将多个传感器的信息进行融合，得到更准确、更完整的机器人状态和环境地图。使用该算法将数据经过融合之后，传入 FPGA 使其修正状态，滤出错误信，能够有效地处理传感器数据的不确定性的噪声信号。

七、系统整合与调试（Integration & Test）

该机器人含有多个模块来共同实现所需功能，对于不同模块，我们做了不同的测试方法来调试至机器人所需的状态，为了更加全面的测试各个模块在不同环境下的工作性能，我们将整个系统的测试与调试分为了摄像头监控周边环境，超声波测距，蓝牙对于机器人足部驱动指令的传输，蓝牙对于机械臂驱动指令的传输，语音播报模块，火焰传感模块，温度传感模块，湿度传感模块，测试数据记录如下：

7.1 机器臂功能验证

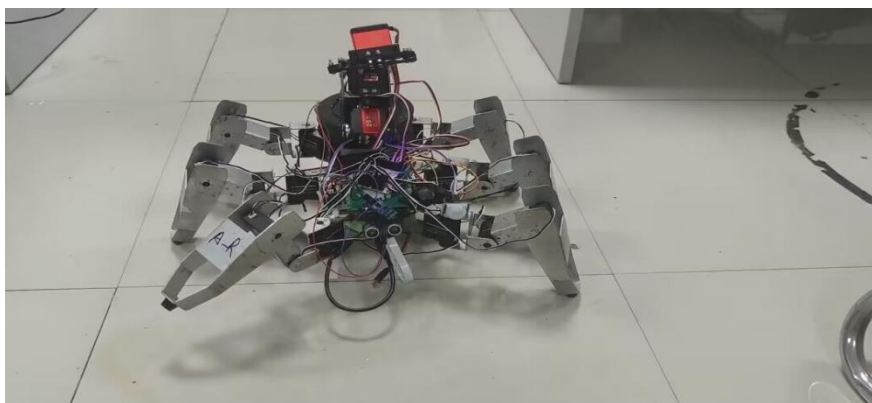


机械臂调试效果图

如图用户可以通过蓝牙模块来控制舵机的角度和抓取动作

蓝牙模块发送指令	是否正确识别	识别结果	控制对象	从机执行情况
7	是	7	机械臂	爪子关
1	是	1	机械臂	左旋
2	是	2	机械臂	右旋
8	是	8	机械臂	爪子开

7.2 行走功能验证



行走调试效果图

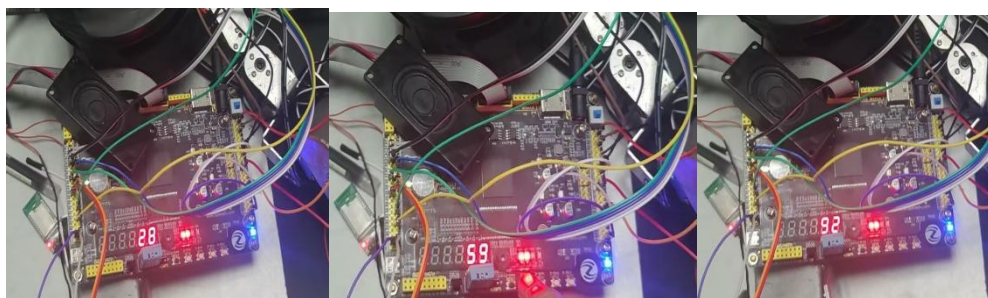
蓝牙模块发送指令	是否正确识别	识别结果	控制对象	从机执行情况
5	是	5	机器人车体	前进
3	是	3	机器人车体	左转
4	是	4	机器人车体	右转
6	是	6	机器人车体	后退

7.3 火焰检测功能验证

实验次数	火焰检测	烟雾报警	四周距离报警	温度报警
1	误触发	正常	正常	正常
2	偶尔误触发	正常	正常	正常
3	正常	正常	正常	正常
4	正常	正常	正常	正常

可见，只要传感器正常工作，以及通讯系统正常，主机就可正常报警，以及提示用户进行相应的操作。

7.4 温湿度及光照功能验证



温湿度及光照调试效果图

经此检测，温湿度及光照模块可以将测量出的数据正确的显示在数码管上。

7.5 摄像头功能验证



实时显示系统调试效果图

经检测，摄像头可以检测出周边环境并实时显示到 VGA 屏幕上。

7.6 语音识别功能验证

	实验总次数	正确识别次数	错误识别次数
一级口令	30	24	6
二级口令	30	24	6

语音识别部分经过多次测试，发现口令识别成功率还是很高的，为避免误识别，在接收口令返回指令的时候增加约束条件，以此来避免由于环境中的杂音所造成的口令误触情况。

八、未来发展与提升（Future Work）

1. 通过无线通讯实现主机控制多个从机，使救援人员可以远程操纵多个机器人。
2. 对机器人加以修改，增加太阳能追光系统，以此来为机器人不断续航。
3. 开发相应的 APP，将算法内置到 APP 中，使之可以在任意移动端实现对机器人的控制。
4. 增加定时任务功能，配合编程功能，使机器人拥有自主定时任务功能。
5. 添加多个机械臂，使每个机械臂之间可以协同操作，增加工作效率。
6. 系统采用层层递进式分布其功能，将系统整个框架结构与安全密码相绑定，保证了器件的安全性能，同时在参数设置部分，采用矩阵键盘输入，大大拓展了密码输入的范围，大大提高了系统的性能。
7. 为机器人增加一个小航模，将其运动与机器人相互约束，可让其处于持续跟随状态时，在高空为机器人提供更加广阔的视野，同时以机器人作为航模的数据中转站，将其所采集到的数据先传送给机器人，然后机器人再反馈到用户以此显示。

九、总结 (Conclusion)

通过这个机器人的制作设计，我真正学会了使用 FPGA 和 Robei EDA 去设计并完成一个硬件电路，对于多个舵机的分时操控，动作的构建都使得我对于算法的概念有了一个初步的了解，并且我也真正了解了理论和实践俩方结合的重要，例如在搭建舵机控制电路时，我的舵机总是会烧，后来经过网上查询资料发现，电路板突然通电时会产生浪涌烧毁电路，使整机和系统接地便得以解决这个问题，在不断的失败和再次尝试中，我也学会了坚持的含义

——刘一鸣

通过这次参赛，我第一次搭建了一个硬件平台，每一个模块之间如何进行通信，对于一个电路来说，走线和元器件的布局都是十分重要的，在硬件开发中，不但得考虑自己的需求，同时还需要满足实际运行的需要，稍有一点差池，便可能造成不同的后果。同时还要满足硬件整体的散热条件，不然容易造成各种电子元件工作异常。

——赵思汉

通过本次作品的设计和制作，让我对于系统信号的认识更上了一层楼，我学习了不同的通信协议，并且了解这些通信协议是如何进行通信，如何将需要的数据从通信所得的结果提取处理，并且还了解了如何解决在信号出现干扰时该如何进行滤波处理

——李娜

十、参考资料（References）

- [1]https://blog.csdn.net/weixin_44129767/article/details/121057086?spm=1001.2014.3001.5501 机械臂控制
- [2]https://blog.csdn.net/weichen_78/article/details/128359759 HC-SR501 人体感应模块介绍
- [3]https://blog.csdn.net/weixin_44678052/article/details/127227758 ov5640 摄像头 SCCB 时序
- [4]<https://blog.csdn.net/Robotway/article/details/129582206> 12 度六足机器人实现步态规划功能
- [5]<https://blog.csdn.net/as480133937/article/details/103439546> pwm 原理
- [6]<http://robei.com>
- [7]《7 天搞定 FPGA-Robei 与 Xilinx 实战》：2016 年电子工业出版社出版，ISBN：978-7-121-29310-9
- [8] <http://www.szdx-smart.com/products-detail/ProId/44.html> DX-BT04-E 技术手册