

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105796

# 六自由度机械臂系统设计与控制方式研究

王凤祥<sup>1</sup> 张志杰<sup>1,2</sup> 陈昊泽<sup>1</sup>

(1. 中北大学 仪器与电子学院 太原 030051; 2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 针对非常热门的机器人技术,搭建一款小型的六自由度机械臂系统。该六自由度机械臂系统包含有电源及调理模块、单片机控制模块、六自由度机械臂机械结构、姿态控制蓝牙手柄、720P 高清晰摄像头模块等 5 个模块构成。后续通过对机械臂系统进行基于 D-H 模型的正运动学和逆运动学分析,进一步加强对机械臂姿态控制。最终通过 SP2 蓝牙手柄与 Zide\_Mini(v1.33)上位机控制软件,实现了对该六自由度机械臂系统进行精准控制。上述研究对机械臂系统进行后续更深层次研究奠定了最重要的基础。

**关键词:** 机器人;六自由度;机械臂;D-H 模型;正逆运动学;姿态控制

**中图分类号:** TP241 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.5030

## Design of 6-DOF manipulator system and research on control method

Wang Fengxiang<sup>1</sup> Zhang Zhijie<sup>1,2</sup> Chen Haoze<sup>1</sup>

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science &amp; Dynamic Measurement, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In view of the very popular robot technology, a small six degree of freedom (DOF) robot arm system is built. The 6-DOF robot arm system consists of five modules: power supply and conditioning module, MCU control module, mechanical structure of 6-DOF robot arm, attitude control Bluetooth handle, 720P high-definition camera module. Subsequently, through the forward kinematics and inverse kinematics analysis of the manipulator system based on D-H model, the attitude control of the manipulator is further strengthened. Finally, through SP2 Bluetooth handle and Zide\_Mini (v1.33) upper computer control software realizes the precise control of the 6-DOF manipulator system. The above research has laid the most important foundation for the further research of the robot arm system.

**Keywords:** robot; six degrees of freedom; robot arm; D-H model; forward and inverse kinematics; attitude control

## 0 引言

人类向智能现代化社会的飞跃式发展得益于机器人技术的出现与成熟,机器人技术的发展与成熟不断影响着我们的生产生活方式<sup>[1]</sup>。机械手臂是近代自动控制领域应用而生的一种新型技术,并已成为现代工业生产与机械制造行业中的不可或缺的重要组成部分<sup>[2]</sup>。

机械手臂作为一款新兴的机电一体化装置,顾名思义,可以模仿人类臂部及手部的部分动作,按照预先设定好的代码,执行相应的轨迹移动,或者实现抓取、搬运或其他动作。它关联多学科范畴,如传感器技术、结构力学、自动控制、计算机科学与技术、电子电路等,是一门跨学科综合技术<sup>[3]</sup>。完整的多自由度机械臂系统,包含电源模块、控制系统、软件算法、机械机构(机械臂支架、底座、舵机、机械爪)等诸多模块单元。

在国外,机器人技术的最早研究,起始于 20 世纪 40 年代的二战时期。主要用于人为操作不便的特殊环境,例如进行核物理研究时处理核废料等<sup>[4]</sup>。在往后的 30 年内,西方国家在机器人领域投入了大量的人力物力进行研究,并取得了丰硕的试验成果,并且多款型号的机器人展现在世人面前,这些机器人功能可能并不完善,但也奠定了日后机器人技术崛起的基础。并且伴随着计算机技术的发展,机器人技术表现出了低成本、高可靠性,高灵活性等优势。20 世纪 70 年代,以美国为首的西方国家,将机器人技术在诸多工业领域进行了大范围的推广。在此期间,很多经济型的机器人,成功的应用于汽车制造、机械加工、冶金、传送、喷漆、焊接等诸多工业领域,从而节省了大量的人力资源。而此时,我国才展开了对机器人技术的研究。

在国内,机器人技术的最早研究可以追溯到 20 世纪 70 年代。时至今日,整体研究进展可归述为 3 大阶段。第

收稿日期:2021-02-05

• 1 •

1 阶段为 20 世纪 80 年代到 90 年代初,主要是为紧跟国外先进技术,弥补差距,其中重要的一项便是机器人技术。国家在见识到国外机器人技术的迅猛发展后,更是马不停蹄地将多款型号的机器人研究定为国家战略性研究计划。第 2 阶段是 20 世纪 90 年代开始,到 21 世纪初这十几年,这一阶段伴随着国家的改革开放与经济爆发式发展,机器人技术发展的主要目标,就是在继续追赶国外脚步的同时,推动机器人技术等先进科技成果转化为劳动力,服务于国民经济各个行业。第 3 阶段为 21 世纪初至今,随着国家整体实力的增强,包括机器人技术、智能技术等多个关键技术处于世界先进行列。在继续完善第 2 阶段战略目标的同时,人们也预见性的想到了未来可能出现的老龄化社会等诸多问题。机器人行业的发展,以及专业人才的培养,均受到了极大的支持与鼓励<sup>[5]</sup>。当然,不可否认的是,相比于国外而言,我国的机器人研究,机器人技术研究起步很晚。经过数十年的发展与追赶,在很多领域实现了与国外齐头并进。但在个别方面,例如机器人的超高精度高精度控制领域,还和国外还有不小的差距。

伴随着国内高等院校教育体系与教学内容的不断优化,很多院校不但开始教授《机器人技术》这门课程,各种小型的机器人、机械臂模块也成为各实验室争相深入研究的热潮,包括机器人结构的设计仿真,路径规划的算法研究等。

本文以此为背景,根据实验室需求,搭建了一款六自由度机械臂系统,接下来用 3 个章节分别对整个六自由度机械臂硬件系统、机械臂 D-H 模型的正逆运动学分析与仿真、六自由度机械臂的详细操作 3 个方面进行讲述。

## 1 硬件设计

### 1.1 机械臂系统总体设计

六自由度机械臂系统由“电源及调理模块、单片机控制系统、六自由度机械臂机械结构、姿态控制蓝牙手柄、720P 高清晰摄像头模块”5 部分构成。如图 1 所示,图 1(a)为机械臂系统的模型结构,图 1(b)所示标识了 6 个舵机位置与序号,在后续的控制算法编程以及对整个机械臂系统进行操控时,均以此编号为准,图 1(c)为机械臂系统实物正视图。

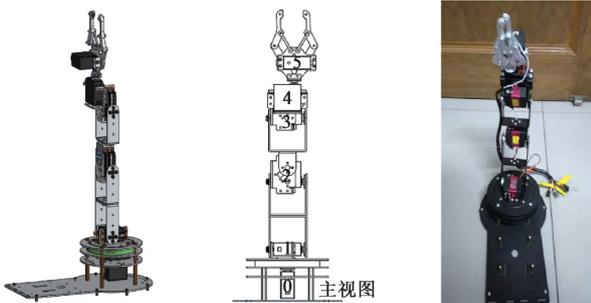


图 1 六自由度机械臂结构

对于整个系统的电源及调理模块,选用深圳劲风科技有限公司生产的 28 V,5 Ah 的锂离子电池。该电池的优点在于充放电稳定安全,可靠性高,可以为整个系统提供稳定且长时间的电源供应。此外,调理电路一方面可以检测电池剩余电量,另一方面通过降温稳流电路组,提供包括单片机控制电路所需电压在内的 6 种不同幅值的稳定电压输出,为系统后续的深入研究提供了充足的电源供应基础。具体的电源及调理模块如图 2 所示。

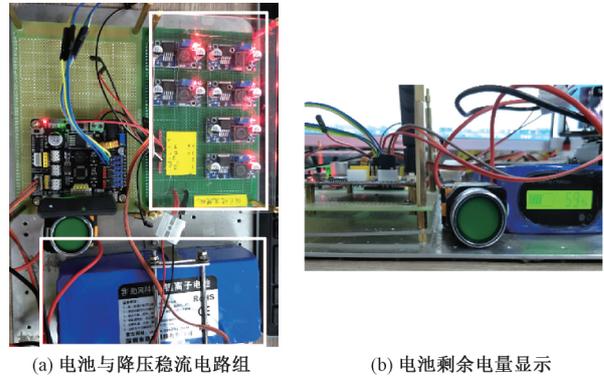


图 2 电源及调理模块

接下来,本节剩余内容将从舵机原理与选型、单片机控制系统、单片机对舵机的控制方式 3 部分内容进行讲述。

### 1.2 舵机工作原理与机械臂系统舵机选型

#### 1) 舵机概念

舵机是一款集成伺服单元,里面包含了直流电机、电位器(或其他角度传感器)和齿轮组减速器等部件,然后封装在一个坚固牢靠的外壳内部<sup>[6]</sup>。

舵机作为一种位置(角度)伺服的驱动器,其较为高精度的输出,简单的控制,使得单片机系统也非常容易与之接口<sup>[7]</sup>。在小型机器人机电控制系统中,舵机可作为基本的输出执行机构,适用于那些需要角度不断变化并可以保持的地方<sup>[8]</sup>。

舵机与普通直流电机的区别主要在于:直流电机在给定的电压电流驱动下可以循环往复地转动。但是舵机是在给定的 PWM 波形下进行一定角度、一定速度的转动<sup>[9]</sup>。

舵机的内部有一个用作传感元件的电位器。这个电位器的作用是:检测输出轴转动角度,将转动角度的信息反馈给控制电路板,然后控制电路板根据反馈的信息,采用“闭环控制”的方式作用于输出单元。如此一来,舵机就可以实现高精度的控制与输出。伺服马达是舵机的另一个且更准确的叫法,普通的直流电机与舵机相比,还有一个最大的区别就是:直流电机无法反馈转动的角度信息<sup>[10]</sup>,所以在日常对直流电机的使用过程中,尤其是在智能小车方面,可以经常看到直流电机是和电机转速编码器一起配合使用的。

舵机主要有如下结构<sup>[11]</sup>:

- (1) 外壳保护结构;
- (2) 齿轮减速箱;

- (3) 直流电机;
- (4) 电位器或其他角度传感单元;
- (5) 控制电路板。

整体的舵机拆解示意图如图3所示。

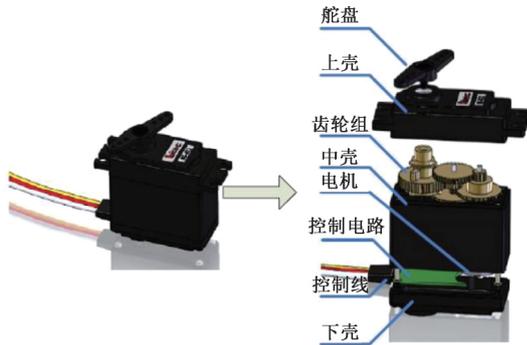


图3 舵机拆解示意图

### 2) 舵机工作原理

舵机的工作原理与执行步骤如下:

- (1) 电路控制板:用于舵机电路控制,连接单片机接口,接收信号同时,驱动舵机内部的直流电机运转<sup>[12]</sup>;
- (2) 齿轮减速箱:该部件的作用是将直流电机轴上的扭矩成倍数的缩小或者放大后最终通过舵盘作用于外部部件;
- (3) 电位器或其他角度传感单元:该部位在齿轮减速箱转动的过程中,测量舵机轴转动角度,并及时将采集到的数据反馈回电路控制板;
- (4) 电路板通过根据电位器回传的角度信息,通过闭环控制法,最后使外部的舵盘转到预定的位置或保持在想要保持的位置。舵机的工作原理如图4所示。

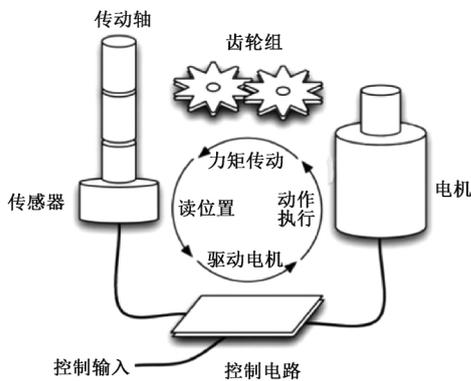


图4 舵机的工作原理

舵机作为整个六自由度机械臂系统中重要的执行部件,在了解了对它的伺服控制系统原理之后,还需要对它的其他性能参数进行了解。如果不了解它的性能,不讲究正确的安装和使用方法,轻则影响模型的该执行机构的精准操作,重则卡住机器人系统或模型无法操纵,造成事故的发生。这里限于篇幅,其他参数及概念就不再一一赘述。

目前,我国在电动舵机研究成果上,已取得破性的进展<sup>[13]</sup>。本文中,六自由度机械臂系统选用了一种国产的特殊类型的舵机,型号为 TBS-K20 数字舵机,该舵机突出特点是具有较大的扭力与较宽的转动角度,适合于机械系统抓取更重物品以及进行更大范围的操作。该型号舵机的详细参数如表1所示。

表1 TBS-K20 数字舵机详细参数介绍

扭力/(kg·cm)	20	转动角度/(°)	270
转动速度/(sec/60°)	0.16	舵机精度/(°)	0.24
工作电压/V	4.8~8.4	脉宽范围/ms	0.5~2.5

### 1.3 控制器选型与性能介绍

六自由度机械臂系统的控制系统采用改进型 51 单片机。相比于传统的 51 单片机开发板,该型单片机系统的最大优点是结构紧凑,安全性强,可靠性高,接口资源丰富,通信简易等。具体结构如图5所示。

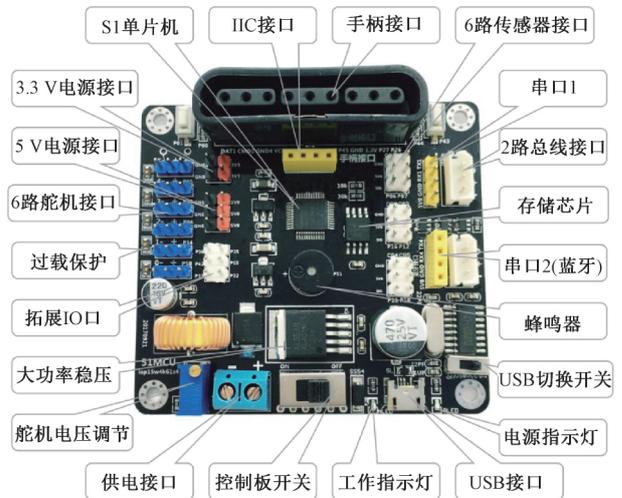


图5 51 单片机控制系统结构

#### 1) 电气资源

在整个机械臂系统中,前后使用涉及到的单片机控制系统的电气资源有如下5点:

- (1) 供电接口:通过电源及调理模块,为整个单片机控制系统提供 7.8 V 的电压;
- (2) 舵机电压调节:本文六自由度机械臂选用的 TBS-K20 数字舵机工作电压为 4.8~8.4 V,通过电位器调节,该单片机控制系统可以完美满足机械臂所需的全部接口与电压需求;
- (3) 控制板开关:通过 ON/OFF 开关实现整个六自由度机械臂系统的工作与否;
- (4) 过载保护:为防止舵机在某种突发状况下有大电流通过而烧坏电机,在流经舵机接口的电源中加了 2 A 保险丝;

(5)其他电源:控制系统自带的 5 V 与 3.3 V 电源接口可以方便六自由度机械臂系统后续开发,搭载更多模块。

#### 2)接口资源

在六自由度机械臂系统中,该单片机控制系统所涉及到的接口资源如下 4 点:

(1)6 路舵机接口:舵机与控制系统通过三根导线连接,分别是:电源正极“+”、负极“-”以及一根信号线,用于传送 PWM 控制信号;

(2)蓝牙手柄接口:专门接 PS2 手柄接收器。连接手柄后可用于对机械臂进行姿态控制;

(3)6 路传感器接口:用于后续机械臂系统拓展,方便搭载更多传感测试模块;

(4)总线接口:在机械臂系统中,通过总线接口可以连接一款 720P 高清晰摄像头,用于后续拓展研究。

#### 3)通信接口

该单片机控制系统的下载通信接口包含有 USB 电脑通信,用于下载程序或者和 PC 进行通信。此外控制系统还包含串口通信接口,用于外接单片串口或者其他 TTL 设备与板子通信。在六自由度机械臂系统中前者用得更多一些,后者可以用于后续的系统拓展。

### 1.4 系统对舵机角度、速度控制方式

在知道系统对舵机角度、速度控制方式前,需要先了解对舵机的伺服控制系统原理,即需要通过一种什么样的信号对舵机进行控制。

舵机的伺服控制系统中,角度由可变宽度的持续的脉冲来进行控制。这种控制方法叫做脉冲调制。舵机控制信号线就是用来传送脉冲的,舵机转动角度是通过脉冲高电平的长短控制<sup>[14]</sup>。

舵机的基准控制信号都是周期为 20 ms 的 PWM 波形,由于舵机型号各异,所以控制舵机角度的脉冲波形介于 0.5~2.5 ms。其中在 1.5 ms 的位置定义为中间位置,该位置的定义是:从该中间位置起始,反转到最小角度与正转最大角度所需要的脉冲宽度完全一样。如图 6 所示为舵机的基准控制信号示意图。

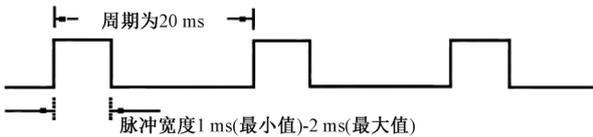


图 6 舵机的基准控制信号示意图

舵机、步进电机、直流电机等都是感性负载。在由单片机控制系统输入 PWM 信号后,TBS-K20 数字舵机内的驱动电路可以直接进行采样。因此,用一个的 PWM 输出引脚即可控制舵机,相比于驱动一个直流电机往往需要用到一个大功率电机驱动电路来说,舵机的这种操作算是极大地简化了传统的复杂电路。

#### 1)对舵机角度的控制

由上述内容可知,对舵机的角度进行精准控制,可以通

过安全单片机输出 50 Hz( $T=20$  ms)的 PWM,控制 PWM 的脉宽调节舵机的转角。控制信号的脉宽预备舵机转动的角度一一对应,所以,通过改变控制信号的脉宽即可达到要控制舵机转动角度的需求。

在后续的第 3 节内容可知,如果通过上位机可视化的 Zide\_Mini(v1.33)控制软件进行对机械臂的控制,也可以对舵机的角度进行高精度的控制。

#### 2)对舵机速度的控制

对舵机的速度进行控制,引入位置 PID 算法,程序如下:

```
Velocity1 = Position_PID1(Position1, Target1);
```

```
Position 1 += velocity 1;
```

```
TIM4->CCR1 = Position1;
```

程序中,通过目标值和舵机的实际位置计算得到的 Velocity1 表示转动速度,然后通过累积的方法,将新值作用到执行器,即舵机上面。如此一来,通过调节 PID 参数,即可调节舵机转动速度。同时,还可以实现当转动到预定位置前减速的功能可以有效地减缓齿轮减速箱的磨损,增加舵机的使用寿命。Position\_PID1 函数程序如下:

```
float Position_PID1 (float Encoder,float Target)
{
    static float Bias,PWM,Integral_bias,Last_Bias;
    Bias = Target-Encoder; //计算偏差
    Integral_bias += Bias; //求出偏差的积分
    Pwm = Position_KP * Bias/100 + Position_KI *
    Integral_bias/100 + Position_KD * (Bias-Last_Bias)/
    100; //位置式 PID 控制器
    Last_Bias = Bias; //保存上一次偏差
    return PWM; //控制量输出
}
```

其中,PID 参数是设定如下:

```
Position_KP=5
```

```
Position_KD=2
```

Position\_KI=0(没有使用 I 控制,因为 PD 控制已经满足要求)

上述 PID 函数中,涉及到的位置式离散 PID 公式如下:

$$pwm = K_p \times e(k) + K_i \times \sum e(k) + K_d[e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

其中, $e(k)$  代表本次偏差; $e(k-1)$  代表上一次的偏差; $\sum e(k)$  代表  $e(k)$  以及之前的偏差的累积和,其中  $k = 1, 2, \dots, k$ 。

## 2 机械臂运动学分析

机器人仿真技术在六自由度机械臂的设计和研发中具有重要意义。Denavit-Hartenberg 模型,简称 D-H 模型,是

1955年由Danevit和Hartenberg针对机器人系统提出的一种非常简单的建模方法<sup>[15]</sup>。该建模方法适用于各种形状的机器人,并且早已成为机器人仿真技术中建模使用的标准方法。

通过D-H模型,对机械臂进行运动学分析分为正运动学分析和逆运动学分析<sup>[16]</sup>。在已知机械臂各关节结构的姿态位置时,求解机械臂末端执行机构(机械爪)的姿态位置称为正运动学分析。想要机械爪位于某个特定位置时,解算机械臂各关节结构应该处于的姿态位置称之为逆运动学分析。

### 2.1 基于D-H模型的正运动学分析

很明显,机械臂的三维运动相对比较复杂,所以在对六自由度机械臂进行正逆运动学分析前,需要先对机械臂结构进行结构简化。

假设机械臂系统是由一系列关节和连杆组成。它们可以在任意平面按照任意位置连接,或是线性滑动结构,或是旋转结构,需要简化的机器人结构均可由一种或数种这样的关节与连杆来代替。在本文的六自由度机械臂系统简化中,多用来代替简化舵机的转动功能。

对机械臂系统进行简化后,接下来即可进行正运动学分析工作。第1步,为每个简化关节结构建立参考坐标系。第2步求解矩阵过程,详细工作就是从第1个参考坐标系到第2个坐标系变换,求得变换矩阵,然后陆续求解第2个坐标系与第3个坐标系之间、第3个坐标系与第4个坐标系之间以及后续的坐标系之间的变换矩阵。最后,将各个变换矩阵结合起来得到一个变换总矩阵即为机械臂从初始关节到末端执行器的变换矩阵。

在上述过程中,涉及到D-H模型思想。D-H模型的精髓在于,认为限制原点与一个坐标轴,由此可以减少两个自由度。最终六自由度机械臂系统的6个自由度的问题就可用4个自由度解决<sup>[17]</sup>。其中,这4个待计算的自由度定义如下:

- 1)  $a_{i-1}$ : 连杆长度,表示两个关节的轴之间的公共法线长度。
- 2)  $\alpha_{i-1}$ : 连杆扭转,表示一个关节的轴相对于另一个关节的轴绕它们的公共法线旋转的角度。
- 3)  $d_i$ : 连杆偏移量,表示一个关节与下一个关节的公共法线和它与上一个关节的公共法线沿这个关节轴的距离。
- 4)  $\varphi_i$ : 关节转角,表示一个关节与下一个关节的公共法线和它与上一个关节的公共法线绕这个关节轴的转角<sup>[18]</sup>。

在确定坐标系的过程中,需要有以下几个步骤:

前文有述,为每个简化关节结构建立参考坐标系。因此,人为制定每个关节的 $x$ 轴与 $z$ 轴方向。如果简化关节为旋转结构,则指定 $z$ 轴方向为关节按右手规则的旋转的方向,关节变量为绕 $z$ 轴的旋转角。如果简化关节为旋转

结构,则指定 $z$ 轴方向为关节沿直线运动的方向,关节变量为沿 $z$ 轴的连杆长度。

当两个简化关节不平行或相交时, $z$ 轴通常是斜线,但总有一条距离最短的公垂线正交于两个简化关节,因此参考坐标系的 $x$ 轴定义为公垂线方向。

如果 $a_n$ 表示 $z_{n-1}$ 与 $z_n$ 之间的公垂线,则 $x_n$ 的方向将沿 $a_n$ 。给每个关节都附上单独的坐标系之后,如图7所示。

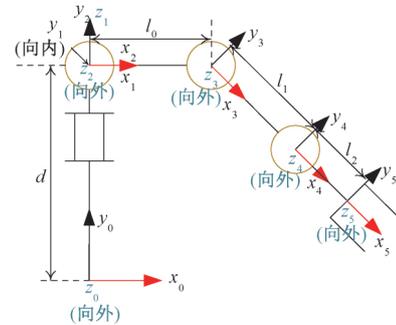


图7 基于D-H模型的简化机械臂模型

机械臂的DH模型参数如表2所示。

表2 机械臂的DH模型参数

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\varphi_i$
1	$-90^\circ$	0	$d$	$\varphi_0$
2	$90^\circ$	0	0	$\varphi_1$
3	0	$l_0$	0	$\varphi_2$
4	0	$l_1$	0	$\varphi_3$
5	0	$l_2$	0	0

根据转换公式:

$${}_{i-1}A = \begin{bmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\varphi_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\varphi_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ \sin\varphi_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\varphi_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

可以从每个关节的4个DH模型参数出发,最后得到一个机械臂的正运动学公式。现在的任务就是求末端执行器相对于 $O_0$ 的A矩阵。

$${}^0_1A = \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ -\sin\varphi_0 & -\cos\varphi_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^1_2A = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & -\sin\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^2_3\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_2 & -\sin\varphi_2 & 0 & l_0 \\ \sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$${}^3_4\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_3 & -\sin\varphi_3 & 0 & l_1 \\ \sin\varphi_3 & \cos\varphi_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$${}^4_5\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

得到各个旋转矩阵之后,即可根据下面公式求得末端执行器的姿态位置坐标为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = {}^0_1\mathbf{A}{}^1_2\mathbf{A}{}^2_3\mathbf{A}{}^3_4\mathbf{A}{}^4_5\mathbf{A} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 2.2 基于 D-H 模型的逆运动学分析

逆运动学分析最基本的思路是从将运动学反转。如图 8 所示,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  为各关节的角度,  $l_0, l_1, l_2$  为 3 个臂长,  $P(x, y, z)$  机械臂末端的姿态位置坐标,其中  $(x, y)$  是 OXY 平面内的坐标。

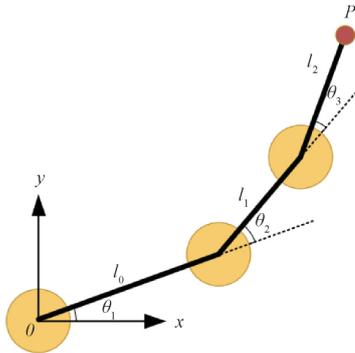


图 8 机械臂逆运动学研究动作拆解示意图

根据图 8 所示,容易推出下列方程:

$$x = l_0 \cos\theta_1 + l_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (9)$$

$$y = l_0 \sin\theta_1 + l_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (10)$$

令  $\alpha = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ , 则:

$$x = l_0 \cos\theta_1 + l_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_2 \cos(\alpha) \quad (11)$$

$$y = l_0 \sin\theta_1 + l_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_2 \sin(\alpha) \quad (12)$$

令:

$$m = l_2 \cos(\alpha) - x \quad (13)$$

$$n = l_2 \sin(\alpha) - y$$

得:

$$l_1 = (l_0 \cos\theta_1 + m)^2 + (l_0 \sin\theta_1 + n)^2 \quad (14)$$

$$\sin\theta_1 = \frac{(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})}{2a} \quad (15)$$

其中,

$$k = \frac{(l_0^2 - l_1^2 - m^2 - n^2)}{2l_1}$$

$$a = m^2 + n^2$$

$$b = -2nk$$

$$c = k^2 - m^2$$

利用同样的方法可以求得另外几个角度。这样便完成了逆运动学相关参数的解算。

### 3 对机械臂系统的操控

接下来,将从两种方式讲述对机械臂系统的各个舵机的姿态控制。

#### 3.1 通过蓝牙手柄对机械臂舵机进行操控

单片机控制系统含有预置的 SP2 蓝牙手柄接口,可用于专门接 PS2 手柄接收器。如此一来,可以通过操控 PS2 蓝牙手柄,就可以对机械臂系统进行姿态控制。如图 9 所示,左图为单片机控制系统上安插的蓝牙手柄接收器,右图为 PS2 蓝牙手柄实物图。



图 9 SP2 蓝牙手柄接收器及手柄

如图 10 所示,为 SP2 手柄各个按钮控制的各个舵机的一一对应关系。其中,LL/LR 控制 0 号舵机;LU/LD 控制 1 号舵机;RL/RR 控制 2 号舵机;RU/RD 控制 3 号舵机;L1/R1 控制 4 号舵机;L2/R2 控制 5 号舵机。

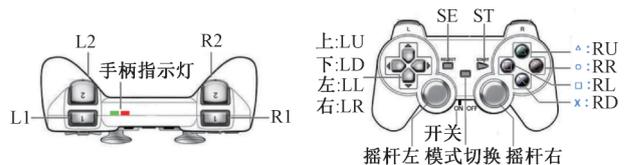


图 10 SP2 手柄各个按钮控制的各个舵机的一一对应关系

在利用手柄控制舵机的过程中,通过上位机对控制系统进行编程,可以调整手柄对各个舵机的控制速度。函数 handle\_ps2() 为手柄控制各个舵机转动的关键程序:

```
void handle_ps2(void)//手柄某个按键控制舵机转动处理程序
```

```
{
    static u32 systick_ms_bak=0;
    static u8 flag=0;
    //设置一个静态变量 flag,用于防止按键在一直按下的状态时舵机持续转动
    if(get_systick_ms()-systick_ms_bak<20)
    {
        return;
    } //每隔 20 ms 检测手柄按键状态(按下或抬起)
    systick_ms_bak=get_systick_ms();
    psx_write_read(psx_buf);
    if((psx_buf[4]==0xfe) && (flag==0))
    { //确定某特定按键按下并且 flag 值=0
        flag=1;//flag 置 1,此后如若按键不抬起,该值将持续为 1
        duoji_doing[0].cur=2 000;//初始值为 1 500,从 1 500 转到 2 000
        duoji_doing[0].aim=2 000;//舵机转动角度目标值
        duoji_doing[0].inc=0;//舵机每 20 ms 角度增量控制
    }
    else if((psx_buf[4]==0xfd) && (flag==0))
    {
        flag=1;
        duoji_doing[0].cur=1 000;
        duoji_doing[0].aim=1 000;
        duoji_doing[0].inc=0;
    }
    else if(psx_buf[4]==0xff)
    //“psx_buf[4]=0xff”意为按键抬起状态,然后将 flag 的值恢复为 0
    {
        flag=0;
    }
    return;
}
```

上述程序是所有程序中关键的一部分。通过上述程序,即可利用手柄对特定舵机进行速度角度控制。该程序兼容性强,可以兼顾到蓝牙手柄上的所有按键的同时,也可同时实现不同舵机转动速度与角度的调节。如此一来,通过 SP2 蓝牙手柄可以对机械臂进行非常灵活的操作。

### 3.2 通过上位机控制软件对机械臂舵机进行操控

除了通过 SP2 蓝牙手柄进行操控外,也可以通过上位机,利用可视化的 Zide\_Mini(v1.33)控制软件可以对六自

由度机械臂各关节的旋转角度进行单独调节。该软件属于类似于 Labview 软件,也是属于一款图形化软件,如图 11 所示,为 Zide\_Mini(v1.33)软件界面。

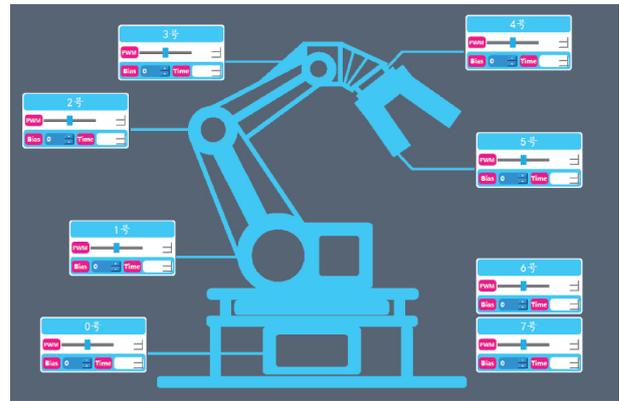


图 11 Zide\_Mini(v1.33)控制软件界面

如图 12 所示,是随机两个舵机的控制子面板。其中“Bias”作用是用来纠正在安装过程中存在的偏差。“PWM”栏即为对所选舵机的控制部分,可以通过调节“PWM”标识右侧的滑动游标,即可对每一个舵机进行精准控制。其中,默认的中间位置为 1 500,滑动游标可以在介于“500~2 500”之间进行滑动,可视化程度非常高。上位机的 Zide\_Mini(v1.33)控制软件操控六自由度机械臂系统,继承了图形化语言最大的优点,便是操作简捷,易于上手。

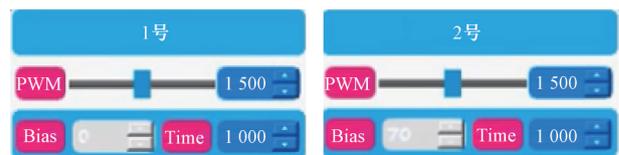


图 12 舵机控制子面板示意图

通过上位机的 Zide\_Mini(v1.33)控制软件操控六自由度机械臂系统与通过 SP2 蓝牙手柄操控机械臂系统两种方式进行对比,前者最大的优点便是可以直观地了解到每个舵机的具体转动角度,这一点是前者做不到的。但是后者是通过蓝牙进行短距离无线控制,前者仍然需要数据线将机械臂系统与上位机连接,在实际应用场合下,后者有更大优势。

## 4 结 论

本文主要讲述了对六自由度机械臂系统的硬件设计、基于 D-H 模型的运动学分析与仿真以及通过两种不同方式对六自由度机械臂系统进行操作。所以到目前为止,实验室针对六自由度机械臂系统的研究已经取得了良好的技术探索与铺垫。接下来,将对该小型机械臂系统展开更加深入的研究,例如通过加装摄像头模块实现六自由度机械臂系统基于机器视觉的物品分拣等高难度研究,同时进一

步对机械臂控制算法及相关的图像处理算法进行探索。

## 致谢

在对六自由度机械臂系统的研究过程中,非常感谢导师张志杰教授全程给予我的指导与鼓励。同时,也非常感谢陈昊泽师兄在实验室研究与生活中给予的帮助与支持。

## 参考文献

- [1] 施嘉濠,竺佳杰,孙滨鑫,等.多自由度机械臂的设计以及运动仿真[J].内江科技,2020,41(11):29-31.
- [2] 关智.一种多关节智能机械手臂控制系统设计[J].机械设计与制造,2011(12):52-54.
- [3] 胡海洪.四自由度液压机械手液压系统设计[D].南昌:南昌大学,2012.
- [4] 王伟,陈跃东,陈孟元.基于 IAPF 与多层 Morphin 搜索树的移动机器人路径规划[J].电子测量与仪器学报,2017,31(2):302-308.
- [5] 寇明赞.工业机器人技术在高职教育领域的发展前景[J].山东工业技术,2019(1):222.
- [6] 李红岩,高阳东.基于 LPC2131 的 RF 遥控多关节蛇形机器人[J].自动化与仪表,2014,29(6):1-4.
- [7] 赵杨.船舶适航性与操纵性自航模系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [8] 刘学菁.舵机对机器人的驱动控制[J].天津职业院校联合学报,2011,13(10):82-85,89.
- [9] 李嘉秀.基于 arduino 平台的足球机器人在 RCJ 中的应用[J].物联网技术,2015,5(3):97-100.
- [10] 陈兴.基于 Zedboard 平台人脸跟踪系统的设计实现[D].西安:西安电子科技大学,2015.
- [11] 张硕.六自由度医疗机械手控制方法研究[D].沈阳:东北大学,2015.
- [12] 刘欣,丁殿磊.基于示教再现实现机械臂路径规划的方法[J].机器人技术与应用,2015(4):34-36.
- [13] 章振宇,周萍,王思洋.单通道旋转弹电动舵机控制系统的设计[J].电子测量技术,2016,39(2):1-3,7.
- [14] 肖晓兰,黄海峰,刘利河,等.一种可自动跟随手机行走的小车[J].机械工程与自动化,2016(2):189-191.
- [15] 罗缘媛.面向人在回路空间遥操作的操作者臂部行为感知与再现技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2014.
- [16] 徐俊.六自由度机械臂可通过性的研究与判定[D].南宁:广西大学,2015.
- [17] 于洋.可穿戴式机械臂协同工作研究[D].长春:长春理工大学,2019.
- [18] 黎宏久.基于视觉的特种机械臂控制研究[D].南京:南京理工大学,2018.

## 作者简介

王凤祥(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为工业相机标定、多自由度机械臂控制、动态测试与校准技术。

E-mail: 3371750184@qq.com

张志杰,博士,教授,主要研究方向为动态测试、数字信号处理等。

E-mail: zhangzhijie@nuc.edu.cn

陈昊泽,博士研究生,主要研究方向为语音信号处理、神经网络、动态测试等。

E-mail: 15930663972@163.com