

2016中国工程机器人大赛暨国际公开赛（RoboWork）

双足竞步工程

技术报告

参赛学校： 重庆邮电大学

队伍名称： hello robot

参赛队员： 李星辰 刘桐雨 瞿荣辉

带队教师： 蔡军 13996393493

二〇一六年五月

关于技术报告使用授权的说明

本人完全了解 2015 中国工程机器人大赛暨国际公开赛（RoboWork）关于保留、使用技术报告和研究论文的规定，即：参赛作品著作权归参赛者本人和比赛组委会共同所有，比赛组委会可以在相关主页上收录并公开参赛作品的设计方案、技术报告以及参赛机器人的视频、图像资料，并将相关内容编纂收录在组委会出版论文集中。

参赛队员签名：_____

带队教师签名：_____

日 期：_____

引言.....	4
中文引言.....	4
英文引言.....	4
正文.....	5
一 舵机控制原理.....	5
1.1 舵机 PWM 信号介绍.....	5
1.2 舵机的原理和控制.....	6
1.3 舵机控制器及转向原理.....	7
1.3.1、概述.....	7
1.3.2、舵机的组成.....	9
1.3.3、舵机工作原理.....	10
1.3.4、舵机选购.....	11
1.3.5、舵机使用中应注意的事项.....	12
1.3.6、辉盛 S90 舵机简介.....	12
二 脉冲.....	13
2.1.1 定义.....	13
2.2.1 脉冲信号.....	13
2.2.2 电磁脉冲.....	14
2.2.3 脉冲反应堆.....	14
2.2.4 脉冲宽度.....	14
2.2 脉冲电源工作原理及应用.....	14
2.2.1. 单脉冲.....	14
2.2.2 直流叠加脉冲.....	14
2.2.3 周期换向脉冲.....	15
2.2.4. 间断脉冲.....	15
三 双足竞步机器人控制系统的设计.....	15
3.1 双足竞步机器人机械结构设计.....	15
3.1.1 机械结构的设计要求.....	16
3.1.2 机械部分的材料选择.....	16
3.2 机械结构的自由度配置.....	16
3.2.1 人体腿部自由度的介绍.....	16
3.2.2 双足竞步机器人自由度的配置.....	17
3.3.3 脚部机械结构的设计.....	17
3.4.4 膝部机械结构的设计.....	19
3.4.5 胯部机械结构的设计.....	20
3.4.6 身区干部机械结构的设计.....	21
3.3 装配.....	22
四 章双足竞步机器人控制系统设计.....	23
4.1 双足竞步机器人驱动的选择.....	23
4.1.1 驱动方案的比较与选择.....	23
4.1.2 舵机及其控制介绍.....	24
4.2 驱动控制方案的设计.....	26
4.2.1 主控芯片介绍.....	26

五 双足竞步机器人步态规划27

 5.1 步态规划介绍.....27

 5.2 双足竞步机器人的运动学建模.....28

 5.3 双足竞步机器人的运动学方程的建立29

 5.3.1 齐次变换.....29

 5.3.2 运动学方程的建立.....30

 5.4 步态规划参数的设定.....34

 5.5 基于运动学方程的步态轨迹规划35

 5.5.1 侧向平面内步态轨迹的规划.....35

 5.5.2 前向平面内步态轨迹的规划.....37

 5.5.3 轨迹曲线的在线调试.....37

参考文献.....37

致 谢.....38

附录.....38

引言

中文引言

舵机控制器；降压芯片；杜邦线；stm32；上位机；脉冲；

1. 研究目的：以上位机（舵机控制器）控制电路板，通过每组角度的调节，实现机器人的直行，弯曲，翻转等功能。
2. 研究方法：舵机可以通过程序连续控制其转角，舵机主要由以下几个部分组成，舵盘、减速齿轮组、位置反馈电位计、直流电机、控制电路。先将舵机逆时针旋转到底（打死），然后垂直套上舵壁，顺时针旋转 90 度即可。调好后安装舵盘。利用脉冲信号实现舵机行走的快慢，脉冲信号是一种离散信号，形状多种多样，与普通模拟信号（如正弦波）相比，波形之间在时间轴不连续（波形与波形之间有明显的间隔）但具有一定的周期性是它的特点。最常见的脉冲波是矩形波（也就是方波）。脉冲信号可以用来表示信息，也可以用来作为载波，比如脉冲调制中的脉冲编码调制（PCM），脉冲宽度调制（PWM）等等，还可以作为各种数字电路、高性能芯片的时钟信号。通过舵机能从 0 度到 180 度之间的转动，实现机器人的行走。
3. 利用舵机控制器，实现了机器人以人行走的步态，实现其翻转，立正，直行等功能

英文引言

PC/host computer/master computer/upper computer; pulses per second;

PC is a computer that can directly send out the control commands, it is generally computer/master computer/upper computer PC/host, the screen shows a variety of signal changes (hydraulic, water level, temperature, etc.). The next bit machine is directly control the equipment to obtain the status of the computer, usually PLC/ microcontroller chip microcomputer/slave computer/lower computer single and so on. The upper computer sends out the order to give the subordinate machine first, the slave computer then according to this order to interpret the corresponding time sequence signal to control the corresponding equipment directly. The slave computer reads the equipment state data from time to time (usually analog quantity), and converts the digital signal to the host computer. So in short, circumstances vary widely, but the status quo is not from the Pope: upper and lower machine are needed to program, there is special development system.

正文

一 舵机控制原理

1.1 舵机 PWM 信号介绍

一. 舵机 PWM 信号介绍

1. PWM 信号的定义

PWM 信号为脉宽调制信号，其特点在于他的上升沿与下降沿之间的时间宽度。具体的时间宽度协议参考下列讲述。我们目前使用的舵机主要依赖于模型行业的标准协议，随着机器人行业的渐渐独立，有些厂商已经推出全新的舵机协议，这些舵机只能应用于机器人行业，已经不能够应用于传统的模型上面了。

目前，北京汉库的 HG14-M 舵机可能是这个过渡时期的产物，它采用传统的 PWM 协议，优缺点一目了然。优点是已经产业化，成本低，旋转角度大（目前所生产的都可达到 185 度）；缺点是控制比较复杂，毕竟采用 PWM 格式。

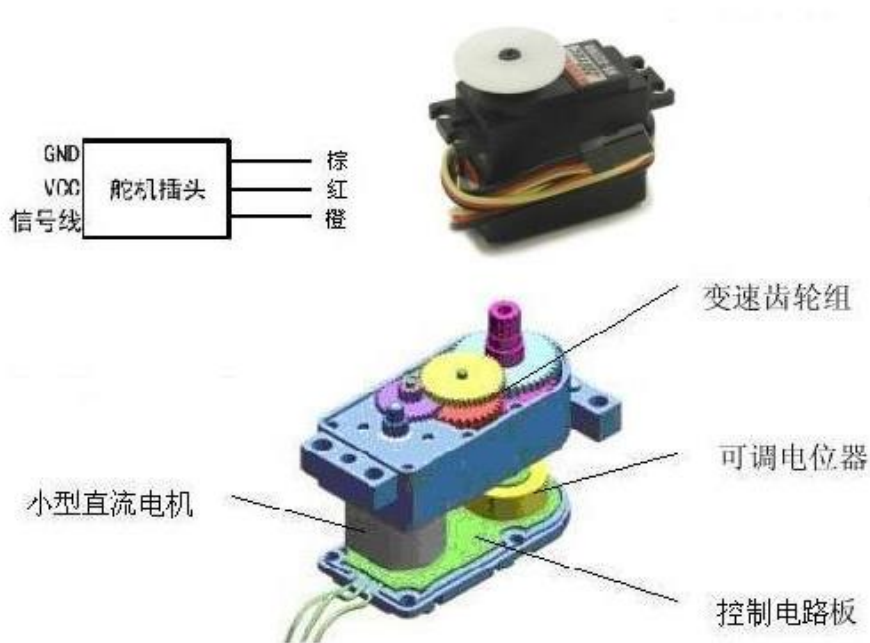
但是它是一款数字型的舵机，其对 PWM 信号的要求较低：

- （1）不用随时接收指令，减少 CPU 的疲劳程度；
- （2）可以位置自锁、位置跟踪，这方面超越了普通的步进电机。

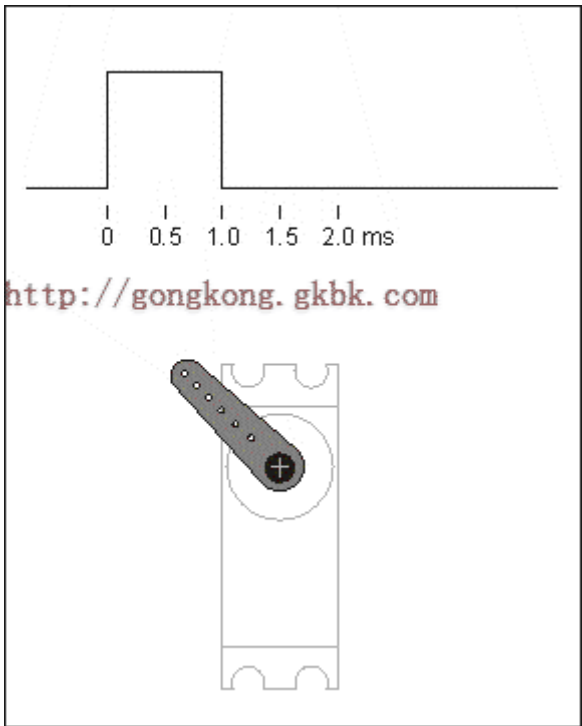
其 PWM 格式注意的几个要点：

- （1）上升沿最少为 0.5mS，为 0.5mS---2.5mS 之间；
- （2）HG14-M 数字舵机下降沿时间没要求，目前采用 0.5mS 就行；也就是说 PWM 波形可以是一个周期 1mS 的标准方波；
- （3）HG0680 为塑料齿轮模拟舵机，其要求连续供给 PWM 信号；它也可以输入一个周期为 1mS 的标准方波，这时表现出来的跟随性能很好、很紧密。

1.2 舵机的原理和控制



控制信号由接收机的通道进入信号调制芯片，获得直流偏置电压。它内部有一个基准电路，产生周期为 20ms，宽度为 1.5ms 的基准信号，将获得的直流偏置电压与电位器的电压比较，获得电压差输出。最后，电压差的正负输出到电机驱动芯片决定电机的正反转。当电机转速一定时，通过级联减速齿轮带动电位器旋转，使得电压差为 0，电机停止转动。



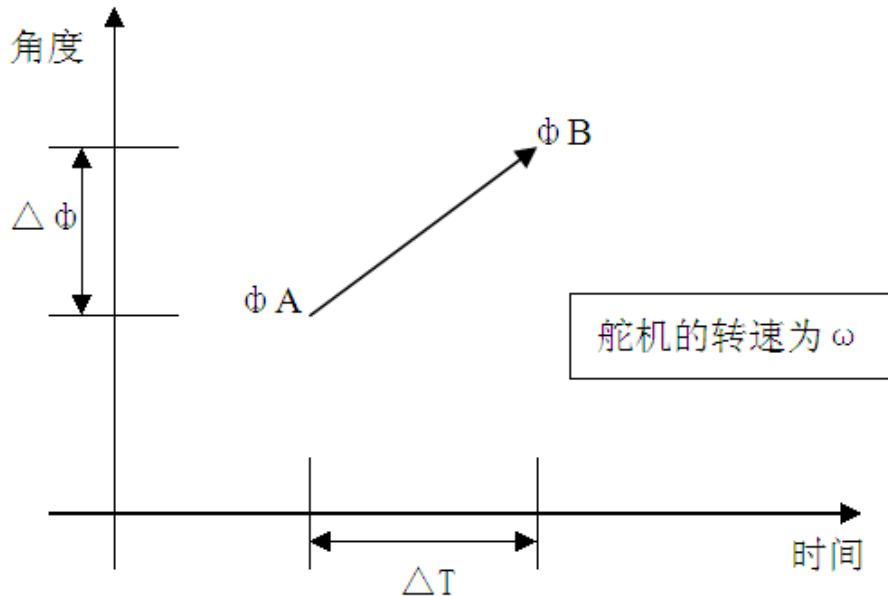
舵机的控制一般需要一个 20ms 左右的时基脉冲，该脉冲的高电平部分一般为 0.5ms-2.5ms 范围内的角度控制脉冲部分，总间隔为 2ms。以 180 度角度伺服为例，那么对应的控制关系是这样的：

0.5ms-----0 度；

1.0ms-----45 度;
 1.5ms-----90 度;
 2.0ms-----135 度;
 2.5ms-----180 度;

1) 舵机的追随特性

假设现在舵机稳定在 A 点，这时候 CPU 发出一个 PWM 信号，舵机全速由 A 点转向 B 点，在这个过程中需要一段时间，舵机才能运动到 B 点。



保持时间为 T_w

当 $T_w \geq \Delta T$ 时，舵机能够到达目标，并有剩余时间；

当 $T_w \leq \Delta T$ 时，舵机不能到达目标；

理论上：当 $T_w = \Delta T$ 时，系统最连贯，而且舵机运动的最快。

实际过程中 w 不尽相同，连贯运动时的极限 ΔT 比较难以计算出来。

假如我们的舵机 $1DIV = 8\mu s$ ，当 PWM 信号以最小变化量即 ($1DIV = 8\mu s$) 依次变化时，舵机的分辨率最高，但是速度会减慢。

1.3 舵机控制器及转向原理

1.3.1、概述

舵机也叫伺服电机，最早用于船舶上实现其转向功能，由于可以通过程序连续控制其转角，因而被广泛应用智能小车以实现转向以及机器人各类关节运动中，如图 1、图 2 所示。



图 1 舵机用于机器人

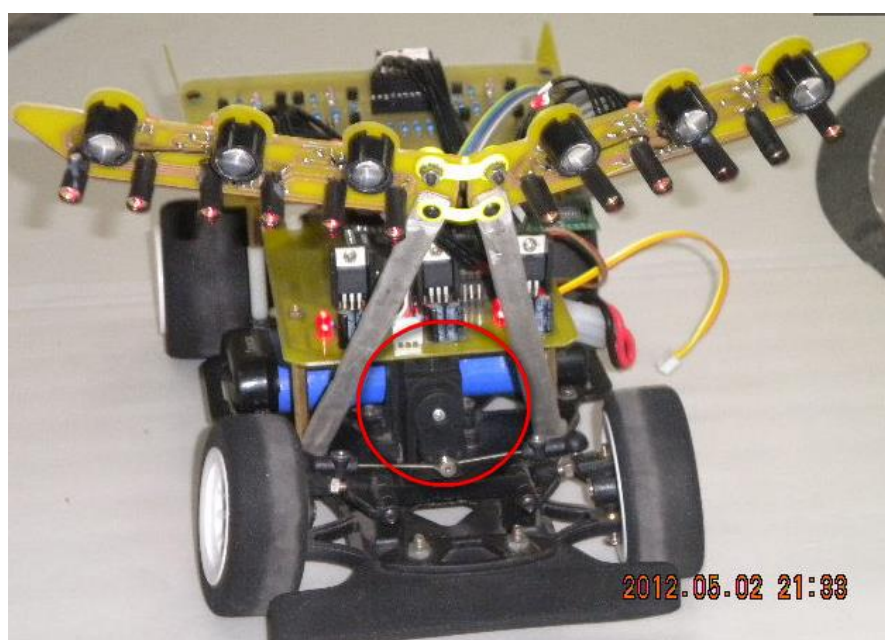


图 2 舵机用于智能小车中

舵机是小车转向的控制机构，具有体积小、力矩大、外部机械设计简单、稳定性高等特点，无论是在硬件设计还是软件设计，舵机设计是小车控制部分重要的组成部分，图 3 为舵机的外形图。



图 3 舵机外形图

1.3.2、舵机的组成

一般来讲，舵机主要由以下几个部分组成，舵盘、减速齿轮组、位置反馈电位计、直流电机、控制电路等，如图 4、图 5 所示。

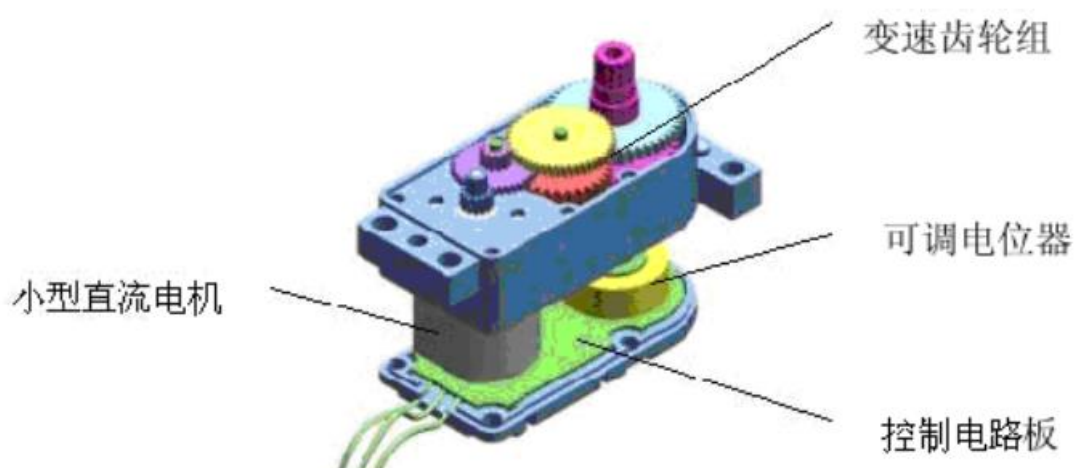


图 4 舵机的组成示意图



图 5 舵机组成

舵机的输入线共有三条，如图 6 所示，红色中间，是电源线，一边黑色的是地线，这辆根线给舵机提供最基本的能源保证，主要是电机的转动消耗。电源有两种规格，一是 4.8V，一是 6.0V，分别对应不同的转矩标准，即输出力矩不同，6.0V 对应的要大一些，具体看应用条件；另外一根线是控制信号线，Futaba 的一般为白色，JR 的一般为桔黄色。另外要注意一点，SANWA 的某些型号的舵机引线电源线在边上而不是中间，需要辨认。但记住红色为电源，黑色为地线，一般不会搞错。



图 6 舵机的输出线

1.3.3、舵机工作原理

控制电路板接受来自信号线的控制信号，控制电机转动，电机带动一系列齿轮组，减速后传动至输出舵盘。舵机的输出轴和位置反馈电位计是相连的，舵盘转动的同时，带动位置反馈电位计，电位计将输出一个电压信号到控制电路板，进行反馈，然后控制电路板根据所在位置决定电机转动的方向和速度，从而达到目标停止。其工作流程为：控制信号→控制电路板→电机转动→齿轮组减速→舵盘转动→位置反馈电位计→控制电路板反馈。流，才可发挥舵机应有的性能。

舵机的控制信号周期为 20MS 的脉宽调制 (PWM) 信号, 其中脉冲宽度从 0.5-2.5MS, 相对应的舵盘位置为 0—180 度, 呈线性变化。也就是说, 给他提供一定的脉宽, 它的输出轴就会保持一定对应角度上, 无论外界转矩怎么改变, 直到给它提供一个另外宽度的脉冲信号, 它才会改变输出角度到新的对应位置上如图 7 所求。舵机内部有一个基准电路, 产生周期为 20MS, 宽度 1.5MS 的基准信号, 有一个比出较器, 将外加信号与基准信号相比较, 判断出方向和大小, 从而生产电机的转动信号。由此可见, 舵机是一种位置伺服驱动器, 转动范围不能超过 180 度, 适用于那些需要不断变化并可以保持的驱动器中, 比如说机器人的关节、飞机的舵面等。

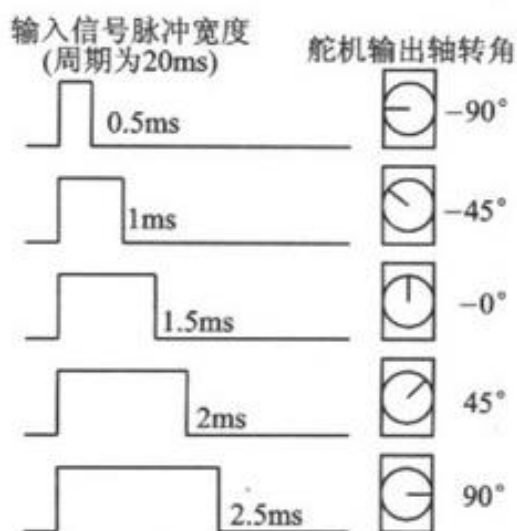


图 7 舵机输出转角与输入脉冲的关系

1.3.4、舵机选购

市场上的舵机有塑料齿、金属齿、小尺寸、标准尺寸、大尺寸, 另外还有薄的标准尺寸舵机, 及低重心的型号。小舵机一般称为微型舵机, 扭力都比较小, 市面上 2.5g, 3.7g, 4.4g, 7g, 9g 等舵机指的是舵机的重量分别是多少克, 体积和扭力也是逐渐增大。微型舵机内部多数都是塑料齿, 9g 舵机有金属齿的型号, 扭力也比塑料齿的要大些。futaba S3003, 辉盛 MG995 是标准舵机, 体积差不多, 但前者是塑料齿, 后者金属齿, 两者标称的扭力也差很多。春天 sr403p, Dynamixel AX-12+ 是机器人专用舵机, 不同的是前者是国产, 后者是韩国产, 两者都是金属齿标称扭力 13kg 以上, 但前者只是改改样子的模拟舵机, 后者则是 RS485 串口通信, 具有位置反馈, 而且还具有速度反馈与温度反馈功能的数字舵机, 两者在性能和价格上相差很大。

除了体积, 外形和扭力的不同选择, 舵机的反应速度和虚位也要考虑, 一般舵机的标称反应速度常见 0.22 秒/60°, 0.18 秒/60°, 好些的舵机有 0.12 秒/60° 等的, 数值小反应就快。

厂商所提供的舵机规格资料, 都会包含外形尺寸(mm)、扭力(kg/cm)、速度(秒/60°)、测试电压(V)及重量(g)等基本资料。扭力的单位是 kg/cm, 意思是在摆臂长度 1 公分处, 能

吊起几公斤重的物体。这就是力臂的观念，因此摆臂长度愈长，则扭力愈小。速度的单位是 $\text{sec}/60^\circ$ ，意思是舵机转动 60° 所需要的时间。电压会直接影响舵机的性能，例如 Futaba S-9001 在 4.8V 时扭力为 3.9kg/cm、速度为 0.22 秒/ 60° ，在 6.0V 时扭力为 5.2kg/cm、速度为 0.18 秒/ 60° 。若无特别注明，JR 的舵机都是以 4.8V 为测试电压，Futaba 则是以 6.0V 作为测试电压。速度快、扭力大的舵机，除了价格贵，还会伴随著高耗电的特点。因此使用高级的舵机时，务必搭配高品质、高容量的电池，能提供稳定且充裕的。

现在市面上的舵机鱼龙混杂，总体来说仿品不如正品，便宜的不如贵的，塑料齿的不如金属齿的，老的不如新的，国内的不如外国的等等，大家不必过于追求极致，根据自身购买力选择够用的就行。

1.3.5、舵机使用中应注意的事项

1)、常用舵机的额定工作电压为 6V，可以使用 LM1117 等芯片提供 6V 的电压，如果为了简化硬件上的设计直接使用 5V 的供电影响也不是很大，但最好和单片机进行分开供电，否则会造成单片机无法正常工作。

2)、一般来说可以将信号线连接至单片机的任意引脚，对于 51 单片机需通过定时器模块出 PWM 才能进行控制。但是如果连接像飞思卡尔之类的芯片，由于飞思卡尔内部带有 PWM 模块，可以直接输出 PWM 信号，此时应将信号连于专用的 PWM 输出引脚上。

1.3.6、辉盛 S90 舵机简介

由于辉盛 S90 良好的性价比，目前市面上的价格一般为 10—15 元，因而广泛应用机器人和智能小车制作设计中，图 8 和图 9 分别为 S90 的外观和参数。



图 8 辉盛 S90 舵机

产品型号	SG90	产品尺寸	23x12.2x29mm	产品重量	9g
工作扭矩	1.6KG/cm	反应转速	0.12-0.13秒/60°	使用温度	-30~+60°
死区设定	5微秒	插头类型	JR、FUTABA通用	转动角度	最大180度
舵机类型	模拟舵机	工作电流		使用电压	3.5-6V
结构材质	塑料齿				
附件包含	线长25CM、黑色QC标、多功能舵角、摇臂、固定螺钉等附件(详见实拍图)				
适用范围	固定翼、直升机 KT、飘飘、滑翔、小型机器人、机械手等模型。				

图 9 辉盛 S90 舵机参数

二 脉冲

2.1.1 定义

电子技术中经常运用的一种象脉搏似的短暂起伏的电冲击(电压或电流)。主要特性有波形、幅度、宽度和重复频率。[1]脉冲是相对于连续信号在整个信号周期内短时间发生的信号，大部分信号周期内没有信号。就像人的脉搏一样。现在一般指数字信号，它已经是一个周期内有一半时间有信号。计算机内的信号就是脉冲信号，又叫数字信号。

2.2.1 脉冲信号

瞬间突然变化，作用时间极短的电压或电流称为脉冲信号。可以是周期性重复的，也可以是非周期性的或单次的。脉冲信号是一种离散信号，形状多种多样，与普通模拟信号（如正弦波）相比，波形之间在时间轴不连续（波形与波形之间有明显的间隔）但具有一定的周期性是它的特点。最常见的脉冲波是矩形波（也就是方波）。脉冲信号可以用来表示信息，也可以用来作为载波，比如脉冲调制中的脉冲编码调制（PCM），脉冲宽度调制（PWM）等等，还可以作为各种数字电路、高性能芯片的时钟信号。所谓脉冲信号表现在平面坐标上就是一条有无数断点的曲线，也就是说在周期性的一些地方点的极限不存在，比如锯齿波，也有电脑里用到的数字电路的信号，0，1。脉冲信号，也就是像脉搏跳动这样的信号，相对于直流，断续的信号，如果用水流形容，直流就是把龙头一直开着淌水，脉冲就是不停的开关龙头形成水脉冲。你把手电打开灯亮，这是直流，你不停的开关灯亮、熄，就形成了脉冲，开关速度的快慢就是脉冲频率的高低。[2]

2.2.2 电磁脉冲

电磁脉冲（EMP）是一个瞬时产生的强大能量场，它对能量波非常敏感，可以在远处破坏无数的电力系统和高技术微型电路。核武器在高空大气层爆炸能产生巨大的电磁脉冲效应，这就是高空电磁脉冲（HEMP）现象。[3]

2.2.3 脉冲反应堆

能在很短时间间隔内达到超临界状态，从而产生很高脉冲功率和很强中子通量，并能安全可靠地多次重复运行的反应堆。它分为热中子脉冲堆和快中子脉冲堆两类。中国建成了一座铀氢锆脉冲反应堆，这是以铀氢锆作燃料的反应堆。它主要以氢作为慢化剂，当功率升高时，温度就会提高，氢的慢化作用减弱，反应性立即降低，反应堆有很大的瞬发负温度系数，因而呈脉冲运行。脉冲反应堆除了用来培训人员、从事研究工作和生产短寿命放射性同位素外，还可用来治疗癌症、中子照相、活化分析及辐照燃料和材料。[4]

2.2.4 脉冲宽度

就是高电平持续的时间。常用来作为采样信号或者晶闸管等元件的触发信号。

2.2 脉冲电源工作原理及应用

2.2.1. 单脉冲

单脉冲一般简称 PC，它除了在功能性电镀中应用外，在用于铝的阳极氧化时，可全面提高氧化膜质量和氧化速率，避免“起粉”、“烧焦”等现象；并由于周期性的电压降低可阻止工件局部表面热量的积累，从而减少由此而带来的烧焦现象。

2.2.2 直流叠加脉冲

直流叠加脉冲是指在直流基波上叠加一个方波脉冲。这种方法通常用于铝的阳极氧化，主要优点是当用 DC 镀方法不能形成均匀的氧化膜时，它能用于所有的铝合金而生成均匀的氧化膜。另外，这种方法在铸造、锻造或机加工的铝件上经短时间的阳极氧化就能形成 25~300 μm 厚氧化膜，并且膜层具有较好的抗磨损和抗腐蚀能力。另外，直流叠加脉冲有时是用来增大脉冲电源的输出功率，它的有效电流等于基波直流电流与脉冲平均电流之和。这种方法的电镀效果与单脉冲的基本相当。

2.2.3 周期换向脉冲

周期换向脉冲电镀习惯称之为双脉冲电镀，简称 PR 镀。应当指出，这里所说的双脉冲含义是双向脉冲，是指在正向阴极脉冲之后引入反向阳极脉冲的电流形式，而非传统意义上的两个不同参数脉冲交替进行的双脉冲形式。PR 镀所依据的电化学原理是，大幅度短时间的反向脉冲所引起的高度不均匀阳极电流分布，会使镀层凸处被强烈溶解而整平。

2.2.4 间断脉冲

间断脉冲也叫间歇脉冲或脉动脉冲，是脉冲的一种周期性中断，也可看做是 PR 镀的反向脉冲电流为零。这种情况由于有间歇时间的存在，利于放电离子的充分恢复，可使脉冲极限电流密度提高。另外，这种方法用于 PR 镀的起镀阶段时，可减轻反向脉冲对基体金属的腐蚀。间断脉冲要求间歇时间能够调节。

三 双足竞步机器人控制系统的研究与设计

论文以研究双足竞步交叉足机器人的步态规划和运动控制为主要目标，设计了以 AX-12+数字舵机为关节驱动元件的控制系统。论文研究的主要工作有三个方面：一是双足竞步机器人控制系统硬件电路的设计与实现；二是双足竞步机器人软件程序方面的实现；三是建立了交叉足机器人模型，对该模型作了运动学解算以及以此为基础的步态规划。首先，对双足竞步机器人进行了整体框架的设计，采用 AX-12+数字舵机作为其关节部位，并对双足采用了交叉足的设计思路，而且双足足底黏上正胶胶皮，增加机器人双足与地的摩擦力，这种装配方式提高了机器人的运动性能和稳定行走的能力。其次，对双足竞步机器人的软件程序和硬件电路系统进行了设计。硬件方面采用了模块化的设计思想，将硬件电路板分为了主控板和通讯板两个部分。主控板采用 C8051F310 单片机作为主控制器，可以更好地与所用舵机进行结合使用。软件方面，利用上位机 VC 调试软件生成双足竞步机器人的步态数组，并结合下位机 C 语言进行编程，实现了对双足竞步机器人的运动控制。最后，论文重点对交叉足机器人做了步态规划。先建立了机器人的运动学模型，并根据齐次变换得到运动学方程，对其进行了逆运动学的解算；针对三步走的步态将机器人的行走姿态轨迹转换成了关节转动角度的曲线；利用 MATLAB 软件对步态规划的结果进行了仿真，验证了规划的可行性。

3.1 双足竞步机器人机械结构设计

双足竞步机器人的机械结构是双足竞步机器人系统中最基础的一部分，是进行驱动控制及步态研究的基础和载体，也是进行步态规划的最直接，最有效的检验平台。

3.1.1 机械结构的设计要求

课题研究的双足竞步机器人主要是用来进行双足机器人步态研究和参加全国机器人大赛狭窄足型双足竞步机器人比赛”所以,进行机器人的机械结构设计,必须首先明确机械结构所需要实现的功能”根据步态研究和比赛的要求,双足竞步机器人机械结构的设计要满足以下要求:

- (1)能够实现双足稳定,连贯,快速的步行;
- (2)保证步行有较好的直线度;
- (3)能够向前、向后翻跟斗;
- (4)能够用不多于 6 只伺服马达及伺服马达控制板来完成步行动作;
- (5)整个机器人最大尺寸为 200mm(长)X300mm(宽)X300mm(高);
- (6)机械结构尽量简洁,最大重量不超过 1Kg;
- (7)单足最大尺寸要能放入(长)100mmX(宽)60mm 长方格内;
- (8)两足印结构站立时不可以交叉重叠
- (9)采用通用零件,降低制造成本;
- (10)在保证以上要求的同时,外形尽量美观。

3.1.2 机械部分的材料选择

根据机械结构设计要求的第 1 条和第 2 条,机械结构设计所采用的材料,要有较高的强度和刚度,来支撑整个身体”根据机械结构设计要求的第 6 条,所选用材料的质量密度不能太大,以便降低机器人的重量,使整个机器人的重量不超过 1Kg 因为机械结构的某些组成部分具有较复杂的形状,所以所选用的材料要便于加工、造型”通过以上分析和借鉴其他类似机器人所选用的材料,我们选择市面上比较常见的厚度为 2mm 的硬质铝板作为制作机械部分的材料”硬质铝板具有重量轻、硬度高、弹性量大等特点,其强度也能满足双足竞步机器人的设计要求。

3.2 机械结构的自由度配置

3.2.1 人体腿部自由度的介绍

通过对人体下肢骨骼肌肉的分析得知,人的髋关节属于球关节机构,有 3 个自由度,能实现前倾(后倾)、外展和向内(向外)旋转等动作,如图 2-1 所示。人的膝关节能实现前后方向的屈伸转动,属于滑车关节类型,具有 1 个自由度,膝关节的结构如图 2-2 所示”踝关节由胫、腓骨下端的关节面与距骨滑车构成,如图 2-3 所示”踝关节属滑车关节,可沿通过横贯距骨体的冠状轴做背屈及跖屈运动在跖屈时,足可做一定范围的侧方运动,即能够进行左右方向的翻转运动和竖直方向的旋转运动,所以一般认为踝关节具有 2 个自由度”现在,国际上的双足机器人,腿部的自由度配置为 6DOF,例如国外的 P 系列、AsIMO、SDR-4X 等,还有国内的/先行者 0 的腿部自由度也是这样配置的。

3.2.2 双足竞步机器人自由度的配置

在配置双足竞步机器人自由度的时候,要求通过尽量少的自由度,来实现尽量多的基本运动,同时又要使这些运动尽量柔顺美观”比赛要求双足竞步机器人最多用 6 个伺服马达来驱动,所以机器人最多有 6 个独立的自由度”因此双足竞步机器人自由度的配置的实质是怎么用不多于 6 个自由度来实现比赛要求的动作,比赛中双足竞步机器人只需完成沿直线行走及向前、向后翻跟斗等简单动作,不需要进行转弯等复杂的动作,所以不用完全按照人腿关节自由度来进行机器人自由度的配置”即使在双足机器人每条腿上配置 6 个自由,这也只是在某种程度上对人体关节自由度的模拟,不可能完全的相同。因此,自由度的配置只要能够实现设计要求就是合理的。山东理工大学硕士学位论文第二章双足竞步机器人机械结构设计人体骸关节的三个自由度中只有一个为控制前向运动的自由度,因为刻门只要求机器人进行前向运动,所以,我们把髓关节处的自由度简化为一个控制前向运动的自由度;膝关节处我们配置一个控制前向运动的自由度;踝关节处我们配置一个控制侧向运动的自由度,来控制机器人在侧向的运动,保证机器人在行走中的平衡。

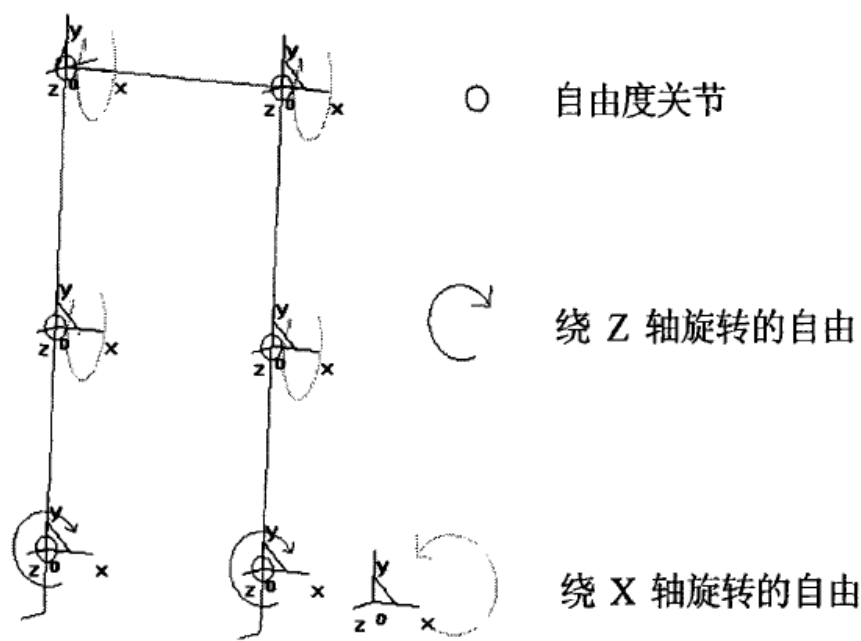


图 2-4 双足竞步机器人自由度配置图

3.3.3 脚部机械结构的设计

为了尽可能的利用比赛规则,在保证一定裕度的前提下使机器人的脚部触地面积最大化,在脚板上打了 5 处孔,来降低脚部机械结构的重量。为了使整个身体的中心尽量在双脚的中间,把脚部控制侧向移动的伺服电机放置在脚的中部脚部机械结构的立体图。如图 2-5 图、2-6 和图 2-7 所示

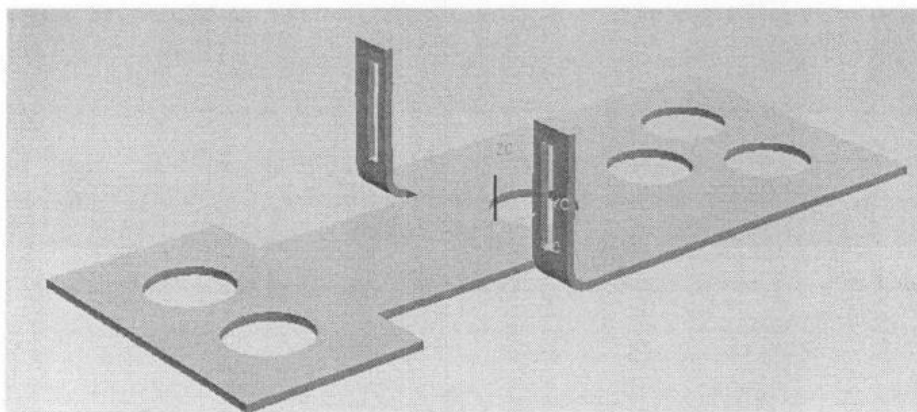


图 2-5 脚部机械结构立体图

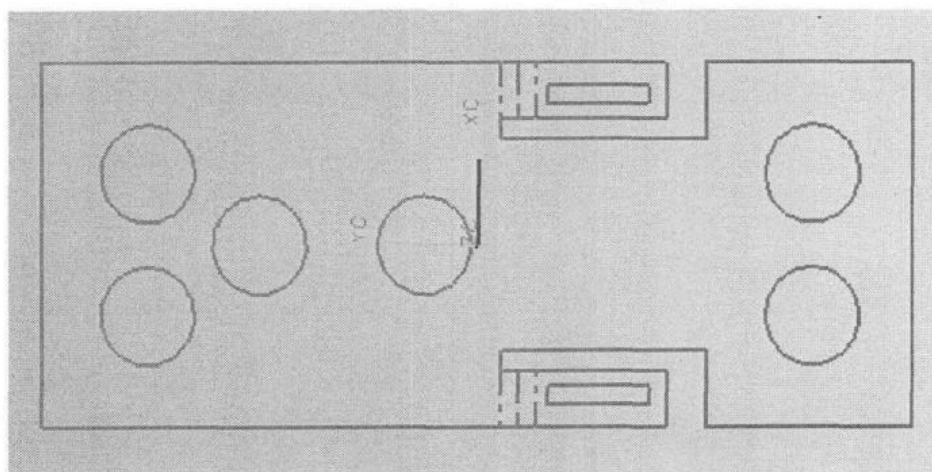


图 2-6 脚部机械结构钣金展开图

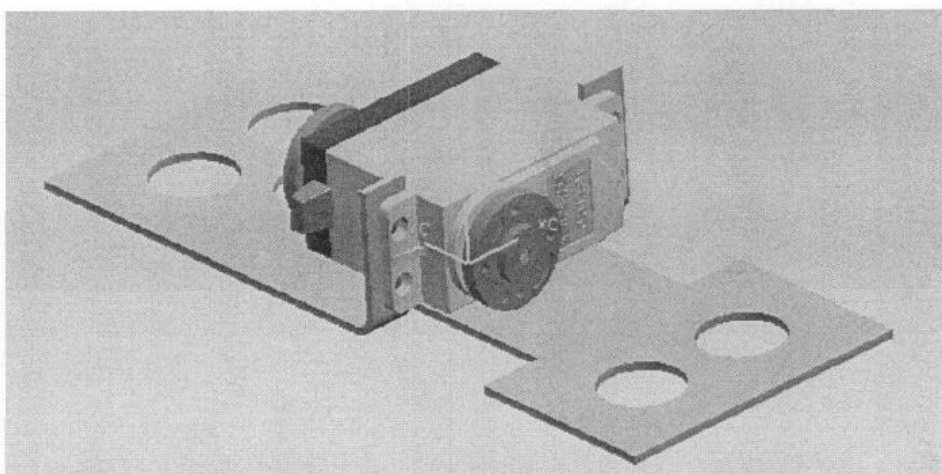


图 2-7 脚部机械结构与伺服电机组装图

3.4.4 膝部机械结构的设计

膝关节的结构设计在整个机器人结构设计中起到非常重要的作用,它是脚部和胯部 12 山东理工大学硕士学位论文第二章双足竞步机器人机械结构设计的过渡,在双足竞步机器人的行走过程中与髓关节处的前向自由度一起控制机器的前向运动”膝部机械结构的立体图、膝部与舵机的装配图和膝部机械结构的钣金展开图分别如图 2—8、图 2—9 和图 2—10 所示

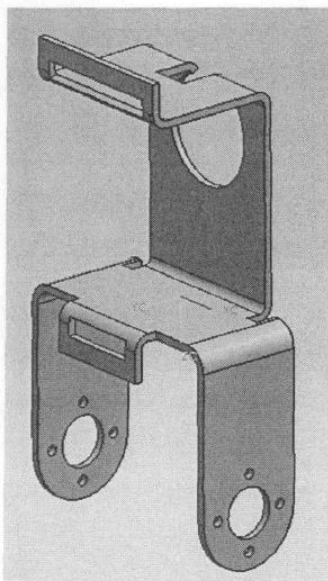


图 2-8 膝部机械结构立体图

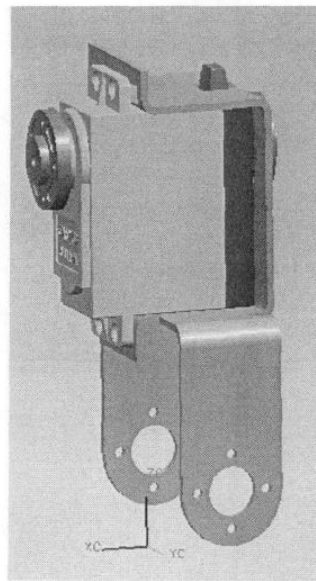


图 2-9 膝部机械结构与伺服电机组装图

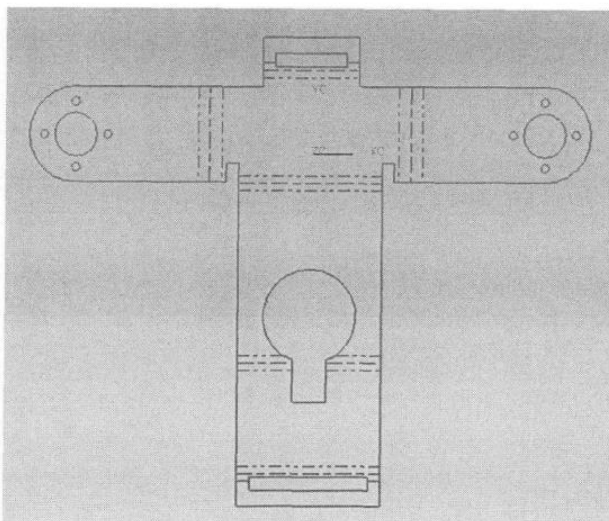


图 2-10 膝部机械结构钣金展开图

3.4.5 胯部机械结构的设计

胯部机械结构是髋关节自由度的载体,是连接膝关节和躯干的桥梁,在前向运动中起主导作用。胯部机械结构的立体图、胯部与舵机的装配图、胯部机械结构展开图分别如图 2-11 图 2-12 和图 2-13 所示

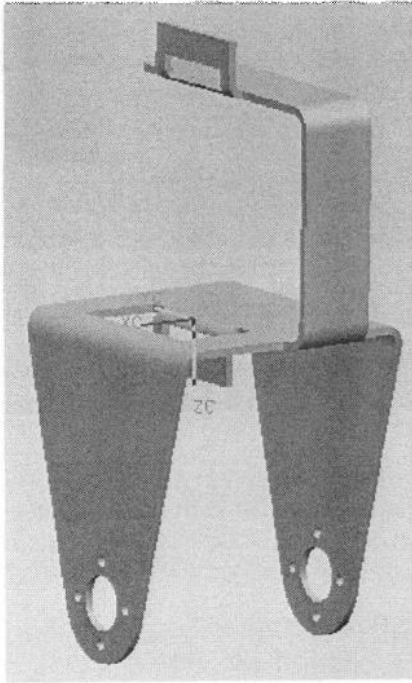


图 2-11 胯部机械结构立体图

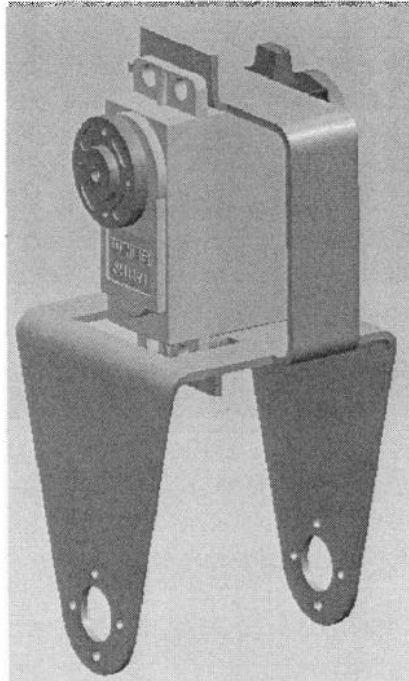


图 2-12 胯部机械结构与伺服电机组装图

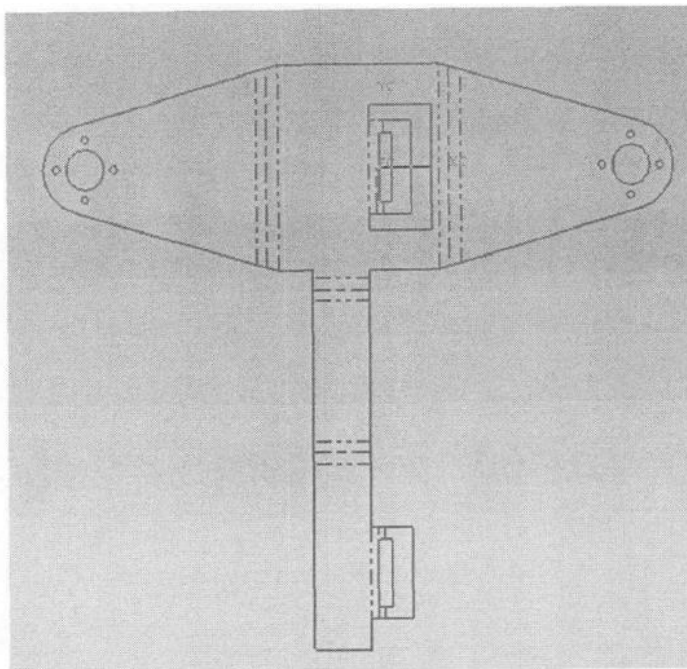


图 2-13 胯部机械结构钣金展开图

3.4.6 躯干部机械结构的设计

躯干部机械结构是组成双足竞步机器人的 4 个模块中功能最多的一个“首先用来连接两条腿, 保证两条腿相对于躯干中心平面的对称; 其次, 它是双足竞步机器人控制模块和电源模块的安装平台; 上面的双角结构是双足竞步机器人完成向前、向后翻跟斗的重要部件”控制电路板安装在躯干的上部, 伺服电机控制口安装在躯干部分的下部”双角部分我们采用顶部为过渡圆弧的结构, 通过设定合适的过渡半径, 保证双足竞步机器人在向前、向后翻跟斗的时候能够有稳定的支撑和光滑的过渡”躯干部平台结构立体图、躯干部平台结构钣金展开图、躯干部角状结构立体图、躯干部左右腿连接部结构立体图、躯干部角状结构钣金展开图、躯干部左右腿连接部结构展开图分别如图 2-14 图 2-15、图 2-16、图 2-17、图 2-18 和图 2-19 所示

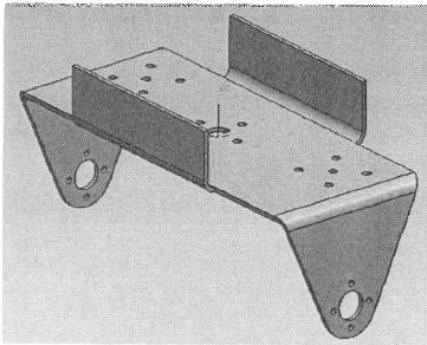


图 2-14 躯干部平台结构立体图

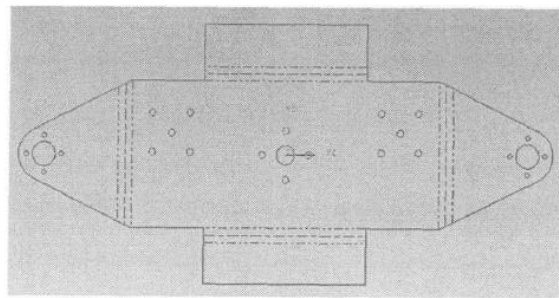


图 2-15 躯干部平台结构钣金展开图

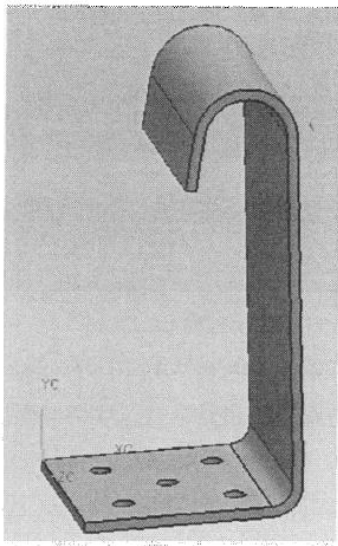


图 2-16 躯干部角状结构立体图

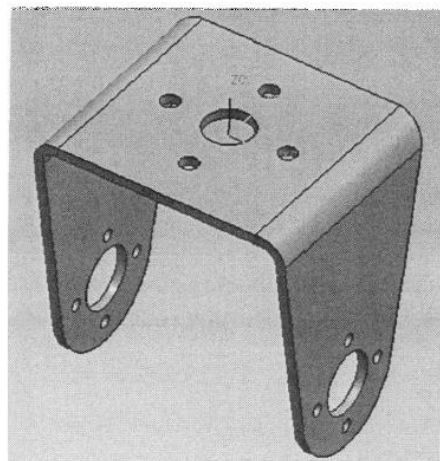
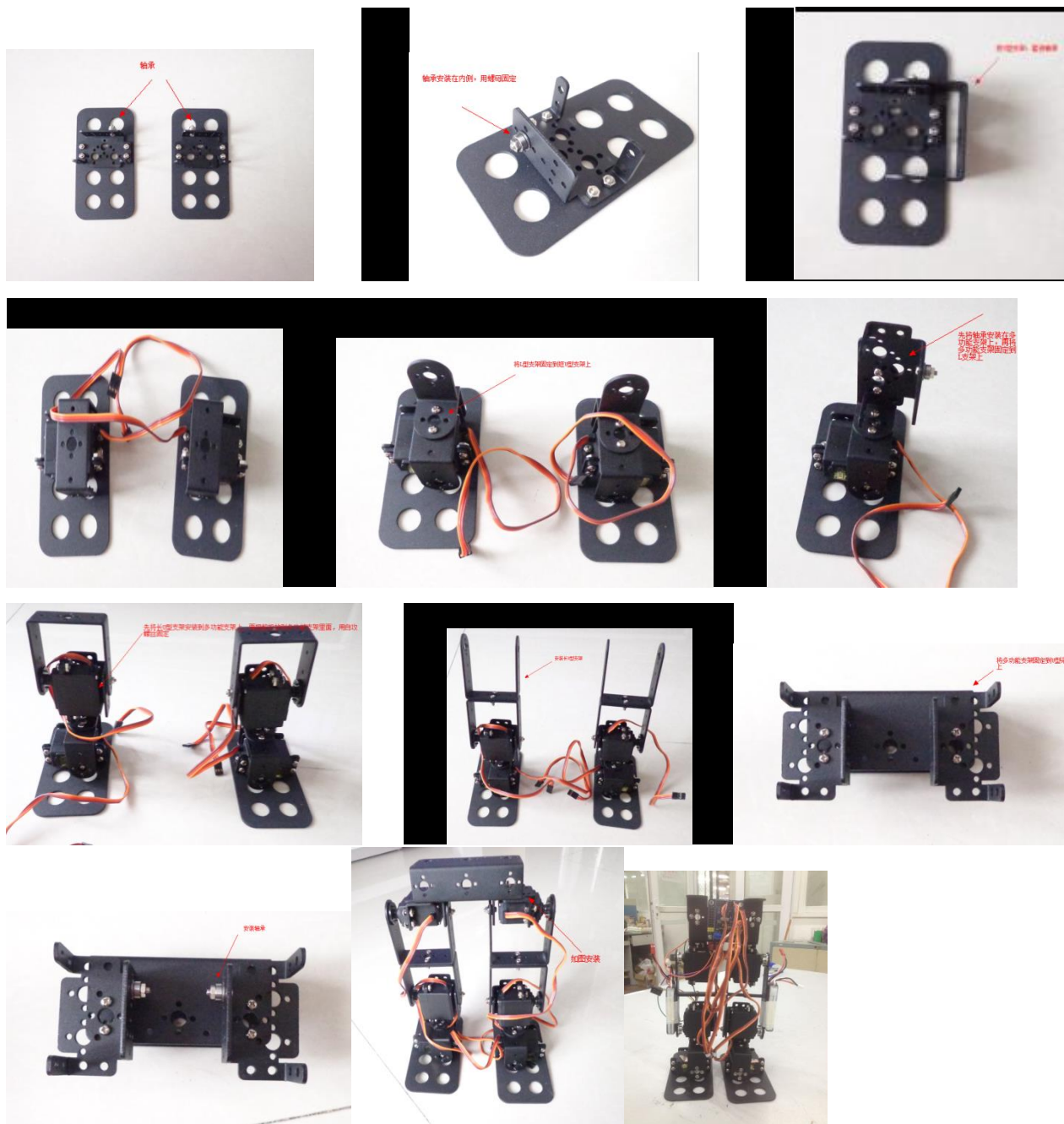


图 2-17 躯干部左右腿连接部结构立体图

3.3 装配

双足竞步机器人的装配分为以下几步:首先对两条腿进行分别组装,依次把脚部、膝部和胯部组装在一起,然后用躯干部的左右腿连接部把左右腿组装在一起,最后安装上躯干部平台和躯干部的双脚。至此,双足竞步机器人已经安装完成,双足竞步机器人的总装配图如图 2-20 所示



四 章双足竞步机器人控制系统设计

4.1 双足竞步机器人驱动的选择

双足竞步机器人的驱动部分是整个机器人系统的执行部分,所有动作的执行、步态的规划都是以它为研究对象的”目前机器人的驱动方式主要有液压驱动、气压驱动和电机驱动三种[16]”考虑到液压驱动具有成本高、重量大、工艺复杂等缺陷,而气动驱动又有稳定性差、不容易控制等缺点,所以目前机器人尤其是小型的双足机器人,一般采用电机驱动的方式。

4.1.1 驱动方案的比较与选择

(1) 驱动方案的介绍与比较

双足机器人常用的电机有三类:直流电机、舵机和步进电机。下面对他们的特点进行简单介绍。

直流电机是机器人平台的标准电机,它有着很宽的功率调节范围、适应性强、具有很高的性价比,调速方便(可无级调速),调速范围宽,低速性能好(启动转矩大,启动电流小),运行平稳,转矩和转速容易控制,适用范围很广,很多轮式机器人采用的都是直流电机,如能力风暴机器人、东北大学及河海大学的 Fira 足球机器人等。到目前为止,直流电机仍是输出功率最强劲的电机,数十年的研究使的直流电机变得更快、更强、更高效,优质的直流电机效率可达 90%。步进电动机是纯粹的数字控制电动机,它能将电脉冲信号转变成角位移,即给一个脉冲信号,步进电动机就转动一个角度,因此非常适合于单片机控制”步进电机作为执行元件,是机电一体化的关键产品之一,广泛应用在各种自动化控制系统中。当步进驱动器接收到一个脉冲信号,它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度(称为步距角 θ),它的旋转是以固定的角度一步一步运行的,可以通过控制脉冲个数来控制角位移量,从而达到准确定位的目的;同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度,从而达到调速的目的。步进电机可以作为一种控制用的特种电机,利用其没有积累误差(精度为 100%)的特点,广泛应用于各种开环控制。由于是开环控制,所以其控制精度不高,舵机最早出现在航模运动中。在航空模型中,飞行机的飞行姿态是通过调节发动机和各个控制舵面来实现的”不仅在航模飞机中,在其他的模型运动中都可以看到它的应山东理工大硕士学位论文第三章双足竞步机器人控制系统的设计用:船模上用来控制尾舵,车模中用来控制转向等等。舵机的工作原理为:控制电路板接受来自信号线的控制信号,控制电机转动,电机带动一系列齿轮组,减速后传动至输出舵盘,舵机的输出轴和位置反馈电位计是相连的,舵盘转动的同时,带动位置反馈电位计,电位计将输出一个电压信号到控制电路板,进行反馈,然后控制电路板根据所在位置决定电机的转动方向和速度,从而达到目标停止的要求,所以,舵机是一种位置伺服的驱动器”但是其转动范围一般不能超过 180 度,所以适用于那些需要角度不断变化并可以保持,例如机器人的关节、飞机的舵面等。

(2) 驱动方案的选择

双足竞步机器人要完成比赛要求的某种动作,其实是各个关节位置的某种组合,对应到电机驱动上,就是各个驱动电机转角的某种组合”所以,如果要想双足竞步机器人精确的实

现各种比赛动作,其本质就是实现对驱动电机旋转角度的精确控制”所以本文选择适合进行位置精确控制的舵机作为双足竞步机器人的驱动。

4.1.2 舵机及其控制介绍

舵机主要由舵盘、减速齿轮组、位置反馈电位计、直流电机、控制电路板等组成。舵机的种类有很多,根据电机分为有刷舵机和无刷舵机;根据传动齿轮分为塑料齿舵机和金属齿舵机;根据输出轴分为滑动轴承舵机和滚动轴承舵机;根据壳体分为塑料外舵机和铝合金外壳舵机;根据速度分为快速舵机和慢速舵机;根据体积分为大中小舵机等等。舵机的主要参数有速度、扭矩、重量和尺寸。速度的单位是 5/60/,也就是舵机以最大速度旋转 60°所用的时间。扭矩的单位是 kgXcm,即舵机在杆长为 1m 的地方能吊起物体的质量,它是舵机的一个非常重要的参数,一般情况下,舵机的速度都能满足需要,主要是以扭矩这个参数来选择舵机”重量和尺寸也是两个比较重要的参数,一般选择重量轻且适合装配尺寸要求的舵机”在选择双足竞步机器人的舵机时,因为踝部需要较大的扭力,所以我们选择了具有较大扭矩的 SH14 一 M 数字舵机,该舵机是专业的小型伺服电机,采用高强度全金属材料制造,由 5 级铜合金正齿轮构成减速器”重复位准确,旋转迅速”配有双端输出支撑端,搭载特殊的高强度舵盘,扭矩可达 14kgXcm,并且可以进行数字位置锁存,大大减少控制端的数据量,适合多级联动控制”装有防撞减震轴承,减少磨损,并且密封.SH14 一 M 数字舵机的主要参数如下表所示舵机的输入线共有三条,如图 3 一 1 所示”红色的是电源线,黑色(有的时候是棕色,例如辉盛 MG995)的是地线,这两根线给舵机提供最基本的能源保证。另外一根线是控制信号线,Futaba 的一般为白色,JR 的一般为桔黄色,通过控制信号线把外部控制信号输入到舵机。

表 3-1 SH14-M 数字舵机的主要参数表

重量	尺寸	扭矩	速度
56g	40×20×46 mm	12kg. cm (6v)	0.2 秒/60 度 (6v)
		14kg. cm (7.4v)	0.18 秒/60 度 (7.4v)

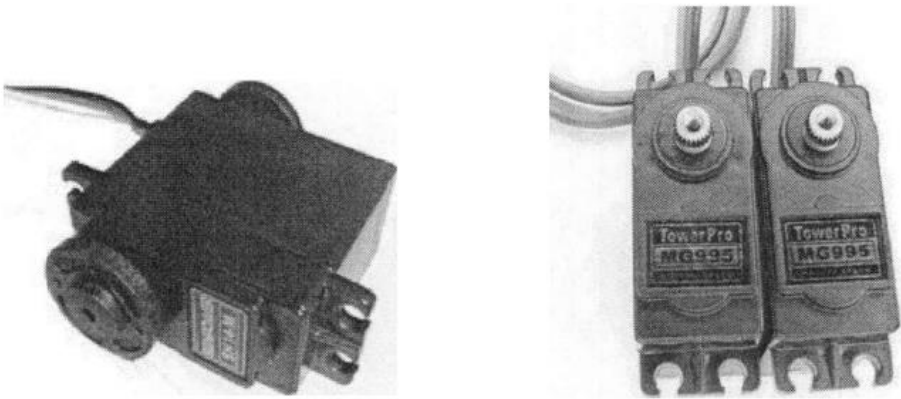


图 3-1 两种有不同颜色输入线的舵机实物图

舵机的控制信号为周期 20ms 的脉宽调制 (PWM) 信号,其中脉宽从 0. sms 一 2. sms,相对应舵盘的位置为 0° 一 180° ,呈线性变化,也就是说,给它提供一定的脉宽,它的出轴就会保

持在一个相对应的角度上, 无论外界转矩怎样改变, 直到给它提供一个另外宽度的脉冲信号, 它才会改变输出角度到新的对应位置上”舵机内部有一个基电路, 产生周期 20ms, 宽度 1.5ms 的基准信号, 有一个比较器, 将外加信号与基准信号相比较, 判断出方向和大小, 从而产生电机的转动信号, 例如脉宽为 0.5ms 对应着舵盘的转角位置为 0° , 脉宽为 1ms 对应着舵盘的转角位置为 45° , 脉宽为 1.5ms 对应着舵盘的转角位置为 90° , 脉宽为 2ms 对应着舵盘的转角位置为 135° , 脉宽为 2.5ms 对应着舵盘的转角位置为 180° 。舵机的 PWM 控制原理及舵机旋转角度与 PWM 高电平持续时间的关系分别如图 3-2 及图 3-3 所示

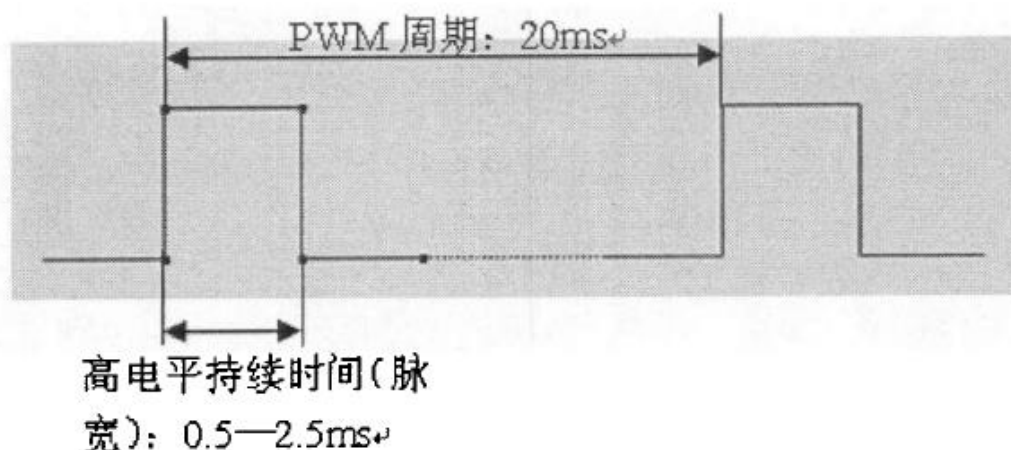


图 3-2 舵机的 PWM 控制

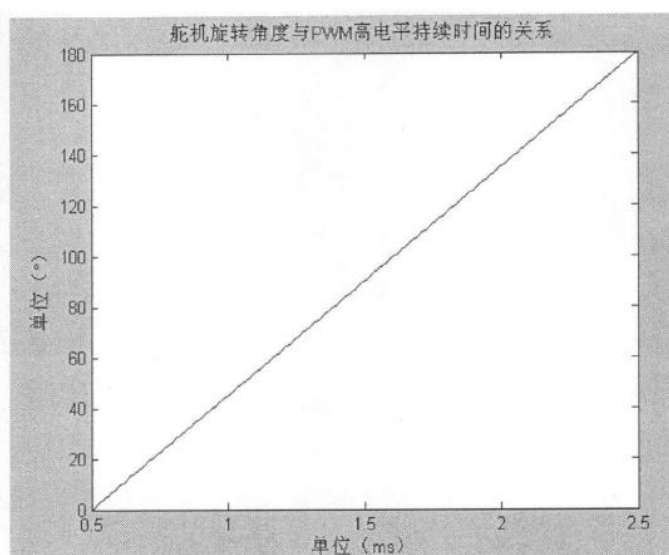


图 3-3 舵机旋转角度与 PWM 高电平持续时间的关系

4.2 驱动控制方案的设计

通过上一节的介绍我们知道,舵机的控制是通过 PWM 控制来实现的。PWM(Pulse Width Modulation)即脉冲宽度调制,具有控制简单、灵活和动态响应好等优点,被广泛应用于测量、通信、功率控制与变换等领域,尤其在机器人、航模设计的舵机、直流电机的控制中,起着越来越重要的作用。信号的生成,主要有三种方法:第一种是利用由一些独立元件组成的模拟电路来实现,这种方法原理简单易懂,但是存在精度不高以及脉宽调整不方便的缺点;第二种是利用可编程逻辑器 FPGA 或 CPLD 来产生相应的 PWM 信号,其中 FPGA 和 CPLD 具有很高的逻辑密度,而且特性丰富,性能也非常高,但是这种方法电路复杂而且成本很高;第三种方法,也是在生成 PWM 信号时应用最广泛的一种方法,是利用单片机作为相应的控制单元来输出 PWM 信号,这种方法具有性能稳定、编程灵活、精度较高、价格低廉等优点,而且其体积较小,是当前生成 PWM 信号进行机器人及航模控制的最优方案。课题选用单片机作为相应的控制单元来进行 PWM 信号的输出。

4.2.1 主控芯片介绍

我们选择 C8051F040 芯片作为我们的主控芯片。C8051F 系列单片机是完全集成的混合信号系统级芯片(SoC),具有与 8051 兼容的高速 CIP-51 内核,与 MCS-51 指令集完全兼容,片内集成了数据采集和控制系统中常用的模拟数字外设及其他功能部件;内置 FLASH 程序存储器内部 RAM,大部分器件内部还有位于外部数据存储器空间的 XRAM。C8051F 单片机具有片内调试电路,通过 4 脚的 JTAG 接口可以进行非入式、全速的在线系统调试。其中 C8051F040 单片机是完全集成的混合信号片上系统型 MCU,具有 64 个数字 I/O 引脚,片内集成了一个 CAN2.0B 控制器。C8051F040 单片机采用 CIP-51 微处理器内核与 MCS-51 指令系统全兼容,可用标准的 ASM-51/Keil C 高级语言开发编译。

(2) C8051F040 单片机的 MCU-CIP-51,采用流水线结构,与标准的 8051 结构相比指令执行速度有很大的提高。在一个标准的 8051 中,除 MUL 和 DIV 以外所有指令都需要 12 或 24 个系统时钟周期。而对于 CIP-51 内核,70%的指令的执行时间为 1 或 2 个系统时钟周期,只有 4 条指令的执行时间大于 4 个系统时钟周期。CIP-51 工作在最大系统时钟频率 25MHz 时,它的峰值速度达到 25MIPS,几倍于其他处理器。图 3-4 是 4 种常见 8 位微控制器内核工作在最大系统时钟频率时峰值速度的比较关系。

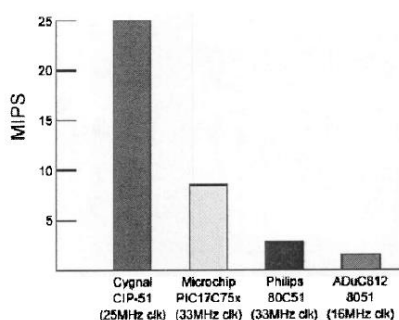


图 3-4 CIP-51 微处理器与其他 MCU 执行指令速度比较图

(3) 扩展的中断系统向 e 护一 51 提供 22 (C8051F3xx 为 12) 个中断源 (标准 8051 只有 7 个中断源), 允许大量的模拟和数字外设中断微控制器。一个中断驱动的系统需要较少的 MCU 干预, 却有更高的执行效率。在设计一个多任务实时系统时, 这些增加的中断源是非常有用的。

(4) MCU 具有 7 个复位源: 一个片内 VDD 监视器、一个看门狗定时器、一个时钟丢失检测器、一个由比较器 0 提供的电压检测器、一个强制软件复位、CNVSTR 引脚及瓜 ST 引脚。瓜 ST 引脚是双向的, 可接受外部复位或将内部产生的上电复位信号输出到瓜 ST 引脚。除了 VDD 监视器和复位输入引脚以外, 每个复位源都可以由用户用软件禁止。

(5) 片内 JTAG 调试电路允许使用安装在最终应用系统上的产品 MCU 进行非侵入式 (不占用片内资源)、全速、在线系统调试, 可在 SiliconLabs 集成开发环境 (IDE) 下通过 JTAG 接口进行编程, 还可通过软件对 FLASH 进行编程。该调试系统支持观察和修改存储器和寄存器, 支持断点、观察点、单步及运行和停机命令。在使用 JTAG 调试时, 所有的模拟和数字外设都可全功能运行。

(6) 具有 64KB 可在线编程的 FLASH 存储器。

(7) 具有 6 个捕捉/比较模块的可编程计数器/定时器阵列

(8) 具有片内 VDD 监视器、看门狗定时器和时钟振荡器, 是真正能独立工作的片上系统。

(9) 端口 F0、瓜 ST 和 JTAG 引脚都容许 5V 的输入信号电压 C8051F 在工业温度范围 (-45℃ 到 +85℃) 工作, 工作电压为 2.7 — 3.6V。虽然采用 3V 供电, 但所有的 F0 端口、瓜 ST 和 JTAG 引脚都容许 5V 的输入信号电压, 在选择漏极开路及输出加上上拉电阻到 5V 电源后, 也可驱动 5V 逻辑器件, 所以 C8051F 和系统的其它电路有很好的兼容性。

五 双足竞步机器人步态规划

步态规划是多足行走机器人研究的一项重要内容, 在双足步行机器人的研究中尤为重要。步态规划的好坏将直接影响到机器人行走过程中的稳定性、所需驱动力矩的大小以及姿态的美观性等多个方面。

5.1 步态规划介绍

步态是在步行运动过程中, 机器人的各个关节在时序和空间上的一种协调关系, 通常由各关节运动的一组时间轨迹来描述。步态规划的目标是产生期望步态, 即产生在某个步行周期中的实现某种步态的各关节运动轨迹 (期望运动轨迹) [35]。步态规划是机器人稳定步行的基础, 也是双足步行机器人研究中的一项关键技术。要实现和提高机器人的行走性能, 必须研究实用而有效的步态规划方法 [36]。完整的步态规划包括两方面的内容: 姿态的规划和 ZMP (Zero Moment Point, 零力矩点) 轨迹的规划, 二者相互影响, 关系密切。所谓姿态的规划, 是指机器人行走过程中其各组成部分运动轨迹的规划, 比如说, 脚掌何时离开地面、摆动相中整个脚掌在空中的轨迹、何时落地等。姿态的规划相对比较简单, 常用的方法是先规划出髋关节与踝关节的轨迹, 然后计算出其它组成部分的轨迹 [37]。当前步态规划的方式主要有

基于仿生学原理和基于力学稳定性这两种”基于仿生学原理的双足步态研究主要是通过测量和分析人的步行运动,研究双足步行的基本原理,将得到的一些基本步态特征运用到双足机器人步态规划和控制中。基本过程是让人模仿机器人的自由度行走(如果机器人有几个自由度,那么人在模仿行走的时候也尽量只动相应的自由度),同时对此人的行走过程进行正面和侧面的录像,然后对这些录像进行分析,得到此人在步行过程各个主要关节的角度变化与时间的函数,然后根据力学相似原理把这些函数相似地推广到机器人的关节变化上 I#1。基于力学稳定性的步态轨迹规划方法又分为基于模型和非模型两种步态规划和控制策略”基于模型的双足控制借鉴已知的物理模型特性对双足机器人模型进行简化,建立了倒立摆模型、被动步态模型、质量弹簧模型等实用控制模型。基于非模型的控制策略从机器人步行运动的约束入手,一般从双足机器人的稳定和能量两方面对双足步态运动加以规划和控制。

5.2 双足竞步机器人的运动学建模

双足竞步机器人的运动学分析是进行步态规划的基础,所以在对双足竞步机器人进行步态规划之前,要先对其进行运动学分析。运动学分析首先对双足步行机器人进行运动学建模。运动学建模的目的是在给定各个关节运动的前提下,确定机器人的各个部分的运动学关系。运动学建模分为正运动学建模和逆运动学建模两个方面,正运动学建模就是根据给定的机器人各个杆件的几何参数和关节的运动情况,求解机器人摆动腿相对于参考坐标系的位姿”逆运动学建模就是通过双足机器人末端的位姿,求解机器人各个关节角的运动情况。目前解决运动学问题的方法很多,我们这里选用被广泛应用的比较直观的坐标变换法和 Denavit — Hartenberg 规则来进行双足竞步机器人的运动学分析。我们首先建立足竞步机器人的运动学模型,并根据对规划的机器人姿态及重心轨迹建立运动学方程最后求解出双足竞步机器人各关节的运动轨迹”图 4 — 1 是我们建立的双足竞步机器人运动学模型。其中的 6 个自由度均为转动关节”所建立的坐标系都满足 Denavit 州 H 叭 enberg 规则:

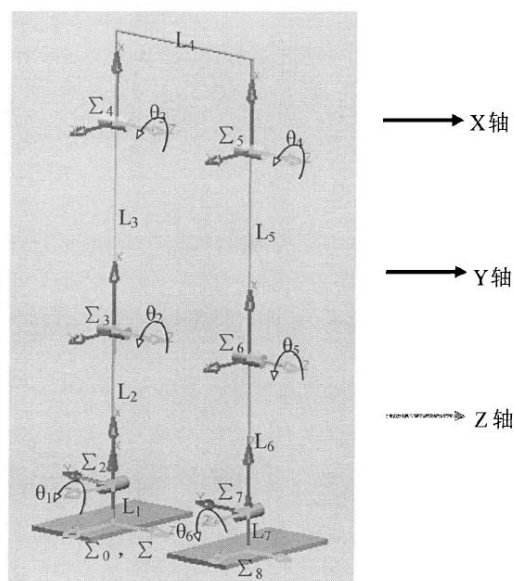


图 4-1 双足竞步机器人运动学模型

表 4-1 双足竞步机器人运动学模型各坐标系信息

坐标系名称	原点位置	固联对象
Σ_0 (o-XYZ)	右脚踝在地面投影	地面
Σ_1 (o-XYZ)	右脚踝在右脚底部投影	右脚
Σ_2 (o-XYZ)	右脚踝中心	右小腿
Σ_3 (o-XYZ)	右膝中心	右大腿
Σ_4 (o-XYZ)	右髋关节中心	躯干
Σ_5 (o-XYZ)	左髋关节中心	躯干
Σ_6 (o-XYZ)	左膝中心	左大腿
Σ_7 (o-XYZ)	左脚踝中心	左小腿
Σ_8 (o-XYZ)	左脚踝在左脚底部投影	左脚

表 4-2 双足竞步机器人运动学模型各坐标系信息

杆件代表机器人相				
杆件名称	关部分	长度 l_i (mm)	质量 (kg)	杆件质心 d_i (mm)
L_1	右脚	15	0.1	10
L_2	右小腿	60	0.1	40
L_3	右大腿	80	0.12	50
L_4	躯干	60	0.3	30
L_5	左大腿	80	0.12	50
L_6	左小腿	60	0.1	40
L_7	左脚	15	0.1	10

双足竞步机器人运动学模型杆件信息表说明：

(1) 由于双足竞步机器人的机械结构是用硬质铝合金加工而成, 质量较轻, 舵机和锂电池的重量相对较大, 所以杆件的质心不在其中心, 一般在舵机和锂电池的安装处;

(2) 杆件 $L^*(i=1, 2, \dots, 7)$ 质心的定义: 从点 i (o-XYZ) 的原点出发, 沿着点 i^* (o-XYZ) 的 X 轴方向到达质心的距离”我们用齐次变换矩阵来描述此三维空间中机体各元素的位置和方向。

5. 3 双足竞步机器人的运动学方程的建立

5. 3. 1 齐次变换

齐次变换是解决机器人各部分间几何关系数学描述的理想手段”因为三维空间中机体的位置和方向可以用齐次变换矩阵来描述。坐标系 c 到坐标系 E_0 的变换矩阵 oT_c , 可表示为:

$$R(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

$$R(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

所以任意关节坐标系相对于基本坐标系的齐次变换矩阵 0T_i 为:

$${}^0T_i = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{i-1}T_i \quad (4-8)$$

5.3.2 运动学方程的建立

我们定义从 Σ_{i+1} 到 Σ_i 的齐次变换矩阵为 ${}^iT_{i+1}$ ($i=0, 1, 2, \dots, 7$), 则:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

假定右腿为支撑腿, 左腿为摆动腿, 则:

$${}^0T_1 = I_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

$$\begin{aligned}
{}^1T_2 &= \text{trans}({}^1p_2) \text{rot}(y, \theta_1) \text{rot}(x, -\frac{\pi}{2}) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 15 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4-11}$$

$$\begin{aligned}
{}^2T_3 &= \text{trans}({}^2p_3) \text{rot}(y, -\theta_2) \text{rot}(x, \frac{\pi}{2}) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 60 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 60 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4-12}$$

$$\begin{aligned}
{}^3T_4 &= \text{trans}({}^3p_4) \text{rot}(z, \theta_3) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 80 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 80 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4-13}$$

$${}^4T_5 = \text{trans}({}^4p_5) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 40 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4-14}$$

$$\begin{aligned}
{}^5T_6 &= \text{trans}({}^5p_6) \text{rot}(z, \theta_4) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -80 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & -80 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4-15}$$

$$\begin{aligned}
{}^6T_7 &= \text{trans}({}^6p_7) \text{rot}(z, \theta_5) \text{rot}(x, -\frac{\pi}{2}) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -60 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & -60 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4-16}$$

$$\begin{aligned}
{}^7T_8 &= \text{trans}({}^7p_8) \text{rot}(z, \theta_6) \text{rot}(x, \frac{\pi}{2}) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -15 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & 0 & \sin \theta_6 & -15 \\ \sin \theta_6 & 0 & -\cos \theta_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4-17}$$

由 (4-8) 得:

$$\begin{aligned}
{}^0T_8 &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 {}^7T_8 \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 60 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&\quad \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & 80 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 40 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & -80 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&\quad \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & -60 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & 0 & \sin\theta_6 & -15 \\ \sin\theta_6 & 0 & -\cos\theta_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-18)
\end{aligned}$$

上式中矩阵的运算复杂, 涉及到 8 个矩阵相乘, 计算量大, 计算过程中容易出现错误, 针对这一现象, 我们通过 Matlab 软件对上式的矩阵运算进行计算。用 Matlab 对上式计算的程序如下:

```

syms theta_1 theta_2 theta_3 theta_4 theta_5 theta_6 x_1 y_1 z_1
 ${}^0T_1$ =[1 0 0 x_1;0 1 0 y_1;0 0 1 z_1;0 0 0 1];
 ${}^1T_2$ =[cos(theta_1) -sin(theta_1) 0 15;0 0 1 0;-sin(theta_1) -cos(theta_1) 0 0;0 0 0 1];
 ${}^2T_3$ =[cos(theta_2) -sin(theta_2) 0 60;0 0 -1 0;sin(theta_2) cos(theta_2) 0 0;0 0 0 1];
 ${}^3T_4$ =[cos(theta_3) -sin(theta_3) 0 80;sin(theta_3) cos(theta_3) 0 0;0 0 1 0;0 0 0 1];
 ${}^4T_5$ =[1 0 0 0;0 1 0 0;0 0 1 40;0 0 0 1];
 ${}^5T_6$ =[cos(theta_4) -sin(theta_4) 0 -80;sin(theta_4) cos(theta_4) 0 0;0 0 1 0;0 0 0 1];
 ${}^6T_7$ =[cos(theta_5) 0 -sin(theta_5) -60;sin(theta_5) 0 cos(theta_5) 0;0 -1 0 0;0 0 0 1];
 ${}^7T_8$ =[cos(theta_6) 0 sin(theta_6) -15;sin(theta_6) 0 -cos(theta_6) 0;0 1 0 0;0 0 0 1];
T= ${}^0T_1$ * ${}^1T_2$ * ${}^2T_3$ * ${}^3T_4$ * ${}^4T_5$ * ${}^5T_6$ * ${}^6T_7$ * ${}^7T_8$ 

```

程序的计算结果如下:

$$\begin{aligned}
\mathbf{n}_x &= 1/4 * \cos(-\theta_6 - \theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) + 1/4 * \cos(\theta_6 - \theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) \\
&\quad + 1/4 * \cos(-\theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) + 1/4 * \cos(\theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) \\
&\quad - 1/2 * \cos(\theta_1 - \theta_6) + 1/2 * \cos(\theta_1 + \theta_6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
n_y &= 1/2 * \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1/2 * \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 - \theta_6) \\
n_z &= -1/4 * \sin(\theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) - 1/4 * \sin(-\theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) \\
&\quad - 1/4 * \sin(\theta_6 - \theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) - 1/4 * \sin(-\theta_6 - \theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) - 1/2 * \sin(\theta_1 + \theta_6) + 1/2 * \sin(\theta_1 - \theta_6) \\
o_x &= 1/2 * \sin(-\theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) - 1/2 * \sin(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) \\
o_y &= \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
o_z &= -1/2 * \cos(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) + 1/2 * \cos(-\theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) \\
a_x &= 1/4 * \sin(\theta_6 - \theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) - 1/4 * \sin(-\theta_6 - \theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) \\
&\quad + 1/4 * \sin(\theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) - 1/4 * \sin(-\theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) + 1/2 * \sin(\theta_1 + \theta_6) \\
&\quad + 1/2 * \sin(\theta_1 - \theta_6) \\
a_y &= 1/2 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 - \theta_6) - 1/2 * \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
a_z &= -1/4 * \cos(-\theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) + 1/4 * \cos(\theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) \\
&\quad - 1/4 * \cos(-\theta_6 - \theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) + 1/4 * \cos(\theta_6 - \theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) + 1/2 * \cos(\theta_1 - \theta_6) \\
&\quad + 1/2 * \cos(\theta_1 + \theta_6) \\
p_x &= 15 + x_1 + 60 * \cos(\theta_1) + 40 * \sin(\theta_1) - 30 * \cos(\theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) - 40 * \cos(-\theta_3 + \theta_1 - \theta_2) \\
&\quad - 40 * \cos(\theta_3 + \theta_1 + \theta_2) - 30 * \cos(-\theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) + 40 * \cos(\theta_1 - \theta_2) + 40 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \\
&\quad - 15/2 * \cos(-\theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) - 15/2 * \cos(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) \\
p_y &= 15 * \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) - 60 * \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 80 * \sin(\theta_2 + \theta_3) + 80 * \sin(\theta_2) + y_1 \\
p_z &= 40 * \cos(\theta_1) - 60 * \sin(\theta_1) + z_1 + 15/2 * \sin(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) + 15/2 * \sin(-\theta_5 - \theta_4 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_2) \\
&\quad + 40 * \sin(-\theta_3 + \theta_1 - \theta_2) - 40 * \sin(\theta_1 + \theta_2) + 30 * \sin(-\theta_4 - \theta_3 + \theta_1 - \theta_2) + 40 * \sin(\theta_3 + \theta_1 + \theta_2) \\
&\quad - 40 * \sin(\theta_1 - \theta_2) + 30 * \sin(\theta_4 + \theta_3 + \theta_1 + \theta_2)
\end{aligned}$$

在机器人行走过程中，我们要求摆动脚脚底始终要与地面平行，所以在行走过程中满足 $\theta_1 = \theta_6$ ，根据这一条件可以对上述齐次变换矩阵的参数进行化简，其结果只需用 θ_1 来代替 θ_6 即可，化简结果此处省略。

5.4 步态规划参数的设定

机器人步态规划常用的方法主要有三种：离线轨迹规划、离线规划)在线调整和完全在线实时规划[39]1.0114.]1.21[#3]。在线实时规划对于算法程序要求很高，计算量大，并受计算机硬件限制，难以做到真正实时。目前广泛采用离线规划)在线调整的方法，这种方法在实现期望步行轨迹和姿态的同时，能够根据适当的外界传感器信息进行在线调整，具有较强的灵活性和适应能力。基于以上介绍，我们选择采用离线规划)在线调整方式对双足竞步机器人进行步态规划”首先离线规划出保证机器人稳定行走的步态，然后在机器人的实际调试中根据实际情况进行姿态调整及步态修正。基于对双足竞步机器人进行步态规划时尽可能模仿人类步行规律的原则，步态规划中参数的设定均参考人类步行的特点，结合双足竞步机器人的实际情况进行设定。山东理工大学硕士学位论文第四章双足竞步机器人步态规划规划机器人行走时重心在地面投影为正弦曲线，且始终保持在脚掌与地面接触的支撑区域内。利用正弦曲线规划机器人重心轨迹，避免了机器人重心在两个脚掌支撑面内转换时所引起的冲击，同时也使关节的转动角度改变更加平滑”把描述重心轨迹的正弦曲线设置在支撑脚所

组成的多边形区域内, 保证机器人静态步行的稳定。规划机器人在行走过程中, 摆动脚和支撑脚的踝关节旋转角度要保持一致, 保证在摆动脚着地时能和地面平行。规划摆动脚在高度方向上的运动轨迹为正弦曲线, 这样可以减小摆动脚着地时引起的冲击。

5.5 基于运动学方程的步态轨迹规划

如果考虑在空间坐标系内规划双足步行机器人各关节处的轨迹, 计算将非常的复杂。由于机器人前向和侧向运动之间耦合较小, 所以将前向和侧向分开来求解, 把双足竞步机器人的步态规划分为侧向平面内步态轨迹的规划和前向平面内步态轨迹的规划两部分来进行求解。

5.5.1 侧向平面内步态轨迹的规划

在侧向运动求解时, 假设机器人前向关节不运动, 仅通过侧向关节的运动使机器人重心在两脚中心线内按正弦规律左右摆动。双足竞步机器人侧向运动的简图如图 4—2 所示, 根据步态规划参数的设定, 在双足竞步机器人步行过程中 $\theta_1 = \theta_6 = e$ 。利用重心公式求

$$Z_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i g Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i g} = \frac{\sum_{i=1}^7 m_i Z_i}{\sum_{i=1}^7 m_i}$$

其中 z_i 为 θ 的函数, 所以机器人重心坐标 Z_{cg} 也为 e 的函数。机器人在行走过程中依次要经过起步阶段、正常行走阶段和停止阶段”下面分别对这三阶段的重心轨迹进行规划, 设定机器人从静止开始, 走三个正常行走周期后。

停止周期: $Z_{cg} = 30 + 30 \sin(\frac{\pi}{2}t)$ $8 \leq t \leq 10$ (单位s)

(4-22)

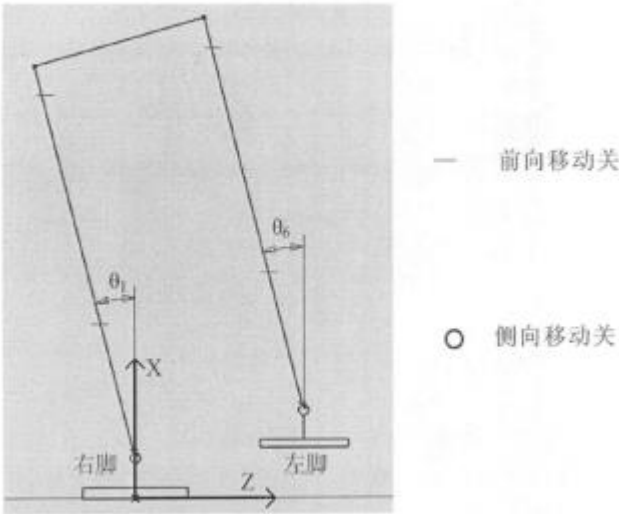


图 4-2 双足竞步机器人侧向运动简图

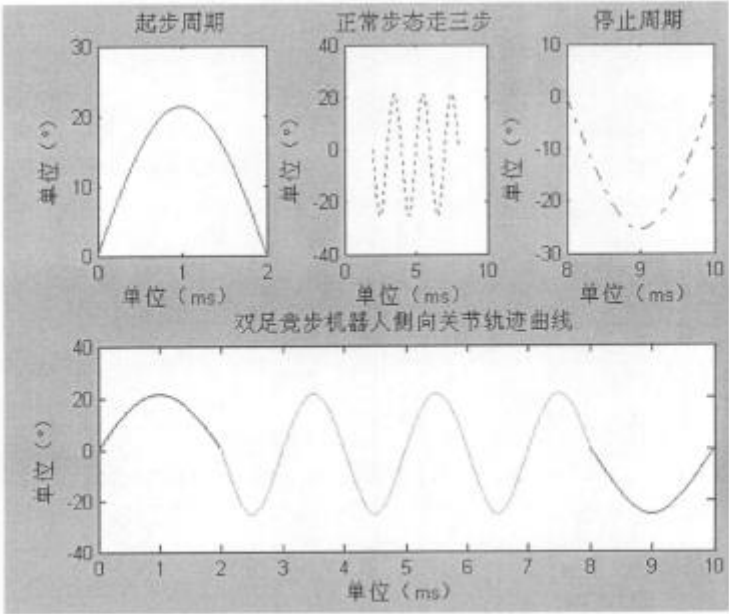


图 4-3 双足竞步机器人侧向关节轨迹曲线

停止周期: $Z_{\text{cg}} = 30 + 30\sin(\frac{\pi}{2}t)$ $8 \leq t \leq 10$ (单位s) (4-22)

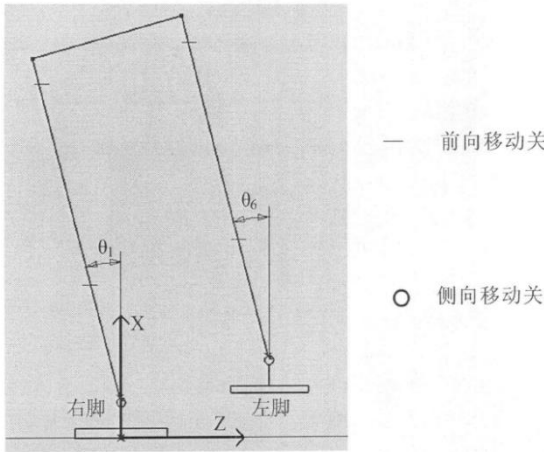


图 4-2 双足竞步机器人侧向运动简图

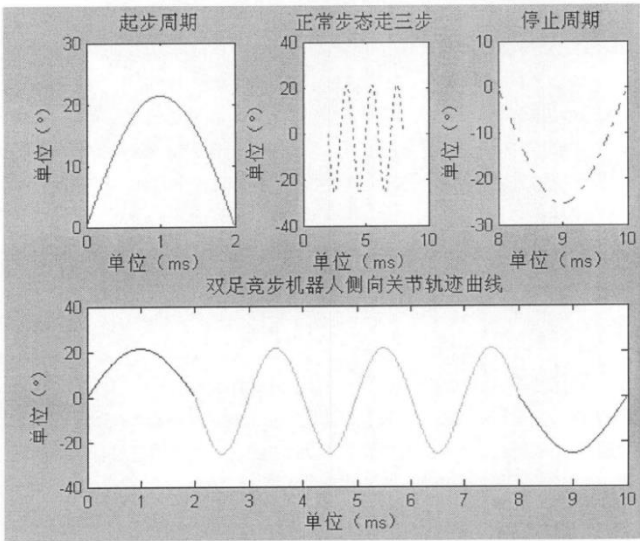


图 4-3 双足竞步机器人侧向关节轨迹曲线

5.5.2 前向平面内步态轨迹的规划

同在侧向步态规划求解时相似,在求解前向步态轨迹时,假设机器人侧向关节不运动。双足竞步机器人前向运动的简图如图 4-4 所示。根据步态规划参数的设定,机器人在行走过程中,摆动脚始终与地面平行(前向运动平面),躯干保持与地面垂直。因为设置摆动脚在高度方向上的运动轨迹为正弦曲线。

5.5.3 轨迹曲线的在线调试

由于运动学建模时对机器人的相关参数进行了简化,在机器人实际的制造和装配过程中也存在着加工误差和装配误差,导致机器人实际的运动学相关参数与理论参数之间存在一定的误差。所以,如果将得到的关节运动曲线直接用于控制舵机的转动,还不能实现平滑而稳定的步态轨迹。针对上述问题,我们选择采用离线规划)在线调整方式对双足竞步机器人的步态进行规划。先将计算得到的关节运动曲线输入到舵机控制器中,在双足竞步机器人实际的行走过程中对局部不稳定的轨迹进行在线修正,得到最终的关节运动曲线。

参考文献

1. 俞志伟. 双足机器人仿生机构设计与运动仿真[D]:7 硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
2. 谢涛, 徐建峰, 张永学, 等. 仿人机器人的研究历史、现状及展望[J]. 机器人, 2002(4):367—374.
3. 包志军, 马培荪, 姜山, 等. 从两足机器人到仿人型机器人的研究历史及其问题[J]. 机器人, 1999(4):312—320.
4. 刘志远. 两足机器人的动态行走研究[D]:7 硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 1991.
5. 张博. 小型双足人形机器人机构设计与步态规划[D]:7 硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
6. 李长春, 王锦, 王宗荣, 等. UG NX4.0 基础教程[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007. 14—16.
7. 张屯国. UG 钣金设计实例与技巧[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. 1—8.
8. 彭宏业, 段哲民. 小型舞蹈机器人的驱动系统设计[J]. 国外电子元器件, 2002(4):367—374.
9. 王光建. 机器人关节的发展现状与趋势[J]. 机械传动, 2004(4):1—5.
10. 张伟, 杜继宏. 双足步行机器人的步态规划[J]. 计算机工程与应用, 2002(13):214—216.
11. 张博, 杜志江, 孙立宁, 等. 双足步行机器人步态规划方法研究[J]. 机械与电子, 2008(4):52—55.
12. 杨东超, 汪劲松, 刘莉, 等. 基于 ZMP 的拟人机器人步态规划[J]. 机器人, 2001(6):504—508.

致 谢

技术报告是在蔡军老师的悉心指导下完成,加上我们小组成员的精心准备凝聚着导师的心血。导师渊博的学识,严谨求实的治学态度,高瞻远瞩的境界以及忘我的工作精神对我影响深远,导师孜孜不倦的教诲和生活上的关怀使我终生难忘”值此论文完成之际,谨敬爱的导师致以深深的感谢和崇高的敬意、感谢同窗好友李星辰,瞿荣辉,刘桐雨等各位同门几年来对作者的支持与帮助,我们在朝夕相处中建立的友谊将源远流长、在机器人竞赛小组这个融洽的大环境里面,大家互相关怀、互相交流,在朝夕相处中建立了深深的友谊,在此表示感谢。最后将更深的感谢献给我的父母,是他们在背后一直默默支持着我,我的所有成绩都归功于他们。

附录

起步:

#2P0#3P0#4P0#8P0#10P0#11P0#13P0T200

#2P89#3P0#4P0#8P0#10P0#11P0#13P-111T100

#2P130#3P0#4P0#8P0#10P0#11P0#13P200T200

#2P0#3P0#4P-111#8P0#10P0#11P0#13P200T100

#2P0#3P-70#4P-180#8P0#10P0#11P0#13P200T100

#2P0#3P-70#4P-180#8P-111#10P-44#11P0#13P200T100

#2P0#3P-160#4P-222#8P-111#10P-44#11P0#13P200T100

#2P0#3P-160#4P-222#8P-222#10P-133#11P0#13P220T100

#2P0#3P-160#4P-290#8P-222#10P-200#11P0#13P40T300

#2P-22#3P-160#4P-311#8P-222#10P-222#11P0#13P-70T100

#2P-133#3P-270#4P-244#8P-244#10P-180#11P0#13P-133T200

#2P-90#3P-180#4P-244#8P-244#10P-222#11P0#13P-22T100

#2P-160#3P-180#4P-180#8P-160#10P-222#11P0#13P-133T600

#2P-222#3P-133#4P-180#8P-244#10P-180#11P0#13P-133T100

#2P-222#3P-70#4P-180#8P-244#10P-111#11P0#13P-111T100

#2P-222#3P-70#4P-180#8P-244#10P-160#11P0#13P-111T100

#2P-200#3P-22#4P-180#8P-180#10P-200#11P0#13P0T100

#2P-180#3P-22#4P-70#8P-90#10P0#11P0#13P0T300
#2P-180#3P-22#4P-70#8P0#10P0#11P0#13P0T100
#2P-180#3P-22#4P89#8P0#10P130#11P0#13P0T100
#2P-180#3P20#4P89#8P89#10P130#11P0#13P0T100
#2P-180#3P110#4P89#8P178#10P130#11P0#13P0T100
#2P-180#3P110#4P156#8P200#10P200#11P0#13P0T100
#2P-180#3P267#4P156#8P289#10P156#11P0#13P-160T200
#2P-180#3P330#4P200#8P310#10P156#11P0#13P-160T100
#2P40#3P178#4P130#8P310#10P310#11P0#13P110T300
#2P156#3P200#4P240#8P178#10P178#11P0#13P220T300
#2P67#3P200#4P67#8P178#10P89#11P0#13P267T500
#2P67#3P130#4P40#8P110#10P89#11P0#13P267T100
#2P67#3P89#4P-44#8P89#10P40#11P0#13P200T100
#2P0#3P0#4P-111#8P0#10P0#11P0#13P200T100

前翻:

#2P0#3P0#4P0#8P0#10P0#11P0#13P0T500
#2P0#3P400#4P178#8P-180#10P-422#11P0#13P0T300
#2P-111#3P778#4P40#8P-90#10P-733#11P0#13P-90T500
#2P-111#3P778#4P-470#8P467#10P-733#11P0#13P-90T200
#2P-22#3P778#4P-733#8P730#10P-733#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P778#4P-733#8P620#10P-800#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P778#4P-733#8P178#10P-733#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P778#4P-733#8P178#10P-22#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P778#4P-733#8P-244#10P530#11P0#13P-90T800
#2P-22#3P778#4P-690#8P-490#10P620#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P778#4P-733#8P-644#10P730#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P778#4P-733#8P-690#10P978#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P778#4P-244#8P-690#10P978#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P-333#4P-244#8P-690#10P978#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P-711#4P289#8P-690#10P978#11P0#13P-90T500

#2P-22#3P-822#4P600#8P-690#10P978#11P0#13P-90T300
#2P-22#3P-800#4P667#8P-733#10P867#11P0#13P-111T600
#2P0#3P-580#4P778#8P-780#10P667#11P0#13P0T600
#2P0#3P-160#4P778#8P-780#10P156#11P0#13P0T300
#2P0#3P0#4P289#8P-290#10P0#11P0#13P-44T300

后翻:

#2P0#3P0#4P0#8P0#10P0#11P0#13P0T300
#2P0#3P0#4P289#8P-290#10P0#11P0#13P-44T300
#2P0#3P-160#4P778#8P-780#10P156#11P0#13P0T300
#2P0#3P-444#4P778#8P-780#10P489#11P0#13P0T300
#2P0#3P-822#4P600#8P-733#10P867#11P0#13P0T300
#2P0#3P-822#4P820#8P-311#10P820#11P0#13P0T300
#2P0#3P-822#4P800#8P-90#10P400#11P0#13P0T300
#2P0#3P-822#4P600#8P356#10P-444#11P0#13P0T500
#2P0#3P-822#4P600#8P710#10P-822#11P0#13P0T300
#2P0#3P-822#4P40#8P710#10P-822#11P0#13P0T300
#2P0#3P-400#4P-133#8P600#10P-822#11P0#13P0T300
#2P0#3P640#4P-470#8P620#10P-800#11P0#13P0T500
#2P0#3P840#4P-580#8P640#10P-800#11P0#13P0T300
#2P0#3P889#4P-560#8P440#10P-800#11P0#13P0T300
#2P0#3P956#4P-333#8P330#10P-844#11P0#13P0T300
#2P-111#3P778#4P40#8P-90#10P-733#11P0#13P-90T500
#2P0#3P400#4P178#8P-180#10P-422#11P0#13P0T300
#2P0#3P0#4P0#8P0#10P0#11P0#13P0T500

直行:

#2P0#3P0#4P-111#8P0#10P0#11P0#13P200T100
#2P0#3P-70#4P-180#8P0#10P0#11P0#13P200T100
#2P0#3P-70#4P-180#8P-111#10P-44#11P0#13P200T100
#2P0#3P-160#4P-222#8P-111#10P-44#11P0#13P200T100

#2P0#3P-160#4P-222#8P-222#10P-133#11P0#13P220T100
#2P0#3P-160#4P-290#8P-222#10P-200#11P0#13P40T300
#2P-22#3P-160#4P-311#8P-222#10P-222#11P0#13P-70T100
#2P-133#3P-270#4P-244#8P-244#10P-180#11P0#13P-133T200
#2P-90#3P-180#4P-244#8P-244#10P-222#11P0#13P-22T100
#2P-160#3P-180#4P-180#8P-160#10P-222#11P0#13P-133T600
#2P-222#3P-133#4P-180#8P-244#10P-180#11P0#13P-133T100
#2P-222#3P-70#4P-180#8P-244#10P-111#11P0#13P-111T100
#2P-222#3P-70#4P-180#8P-244#10P-160#11P0#13P-111T100
#2P-200#3P-22#4P-180#8P-180#10P-200#11P0#13P0T100
#2P-180#3P-22#4P-70#8P-90#10P0#11P0#13P0T300
#2P-180#3P-22#4P-70#8P0#10P0#11P0#13P0T100
#2P-180#3P-22#4P89#8P0#10P130#11P0#13P0T100
#2P-180#3P20#4P89#8P89#10P130#11P0#13P0T100
#2P-180#3P110#4P89#8P178#10P130#11P0#13P0T100
#2P-180#3P110#4P156#8P200#10P200#11P0#13P0T100
#2P-180#3P267#4P156#8P289#10P156#11P0#13P-160T200
#2P-180#3P330#4P200#8P310#10P156#11P0#13P-160T100
#2P40#3P178#4P130#8P310#10P310#11P0#13P110T300
#2P156#3P200#4P240#8P178#10P178#11P0#13P220T300
#2P67#3P200#4P67#8P178#10P89#11P0#13P267T500
#2P67#3P130#4P40#8P110#10P89#11P0#13P267T100
#2P67#3P89#4P-44#8P89#10P40#11P0#13P200T100
#2P0#3P0#4P-111#8P0#10P0#11P0#13P200T100