



吉林大学

JILIN UNIVERSITY

本科生毕业论文（设计）

中文题目 六足机器人及其控制系统设计

英文题目 Hexapod Robot and Its Control System Design

2023 年 06 月

摘要

随着科技的发展，机器人的应用场景已经不再局限于常规条件与环境，而是更多的趋向诸如灾情搜救、地貌勘探、资源开采等环境复杂条件恶劣的场景。这些场景对机器人的稳定性与敏捷度均具有较高的要求。足式机器人能实时调整自己的姿态保证重心与位置的稳定，相比传统的履带机器人与轮式机器人具有更高的稳定性与机动性。论文以六足机器人作为主要研究对象，通过结构与控制系统的设计使得机器人可以完成遥控、图传与追踪等功能。

首先本文对机器人的结构可选方案进行了介绍，将不同类型的足个数与足排列方式进行了对比，确定了六足椭圆并列式设计作为结构方案。随后，本文建立了六足机器人的正运动学模型，并依此设计了机器人的动作组，实现了机器人的基础运动功能。

其次，本文介绍了基于 UDP 的 socket 通信的基础原理，并以此为基础设计了基于公网的图传系统与遥控系统，并介绍了基于 tkinter 编写的上位机与监控软件。除此以外，本文还介绍了针对数据传输中的丢包问题设计的信息校验方法。

再次，本文介绍了针对机器人独自工作下的目标识别需求设计的不同视觉识别方法。循线使用霍夫变换，追踪色块则使用 HSV 颜色空间阈值法，检测诸如人脸等复杂目标则使用级联分类器。另外，本文还比较了神经网络与级联分类器的性能与指标，最终确定在本设计中选择级联分类器作为复杂目标的检测方法。

最后，本文介绍了机器人硬件选型与其指标，并对整体的控制逻辑进行了介绍。在整体介绍以后针对机器人的目标追踪问题给出了解决方案，设计遥控器解决了离线操控的问题，并且设计了姿态校正解决了机器人因为机械误差造成了直行偏移问题。经过实际测试，机器人可以满足实际使用中遥控与图传监控的大部分需求。

关键词：六足机器人；树莓派；遥控图传；视觉识别

Abstract

With the development of science and technology, the application scenarios of robots are no longer limited to conventional conditions and environments, but more tend to be in complex and harsh environments such as disaster search and rescue, landform exploration, and resource mining. These scenarios have high requirements on the stability and agility of the robot. The legged robot can adjust its posture in real time to ensure the stability of the center of gravity and position. Compared with traditional tracked robots and wheeled robots, it has higher stability and mobility. The thesis takes the hexapod robot as the main research object. Through the design of structure and control system, the robot can complete functions such as remote control, image transmission and tracking.

First of all, this paper introduces the optional structure of the robot, compares the number of different types of feet and the arrangement of the feet, and determines the six-legged elliptical side-by-side design as the structural solution. Subsequently, this paper establishes the forward kinematics model of the hexapod robot, and designs the action group of the robot based on this, and realizes the basic motion function of the robot.

Secondly, this paper introduces the basic principle of socket communication based on UDP, and based on this, the image transmission system and remote control system based on the public network are designed, and the host computer and monitoring software based on tkinter are introduced. In addition, this paper also introduces the information verification method designed for the problem of packet loss in data transmission.

Thirdly, this paper introduces different visual recognition methods designed for the target recognition needs of robots working alone. Hough transform is used to follow lines, HSV color space thresholding is used to track color patches, and cascaded classifiers are used to detect complex objects such as faces. In addition, this paper also compares the performance and index of neural network and cascade classifier, and finally decides to choose cascade classifier as the detection method of complex targets in this design.

Finally, this paper introduces the robot hardware selection and its indicators, and introduces the overall control logic. After the overall introduction, a solution is given for the robot's target tracking problem. The design of the remote control solves the

problem of offline control, and the design of the attitude correction solves the problem of the robot's straight-line deviation caused by mechanical errors. After actual testing, the robot can meet most of the needs of remote control and image transmission monitoring in actual use.

Keywords: Hexapod robot; Raspberry Pi; remote control; image transmission; visual recognition

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 六足机器人研究背景.....	1
1.2 六足机器人发展历程.....	1
1.3 六足机器人关键问题.....	3
1.3.1 步态规划.....	3
1.3.2 障碍规避.....	3
1.4 论文研究内容.....	4
第 2 章 六足机器人结构设计.....	5
2.1 六足机器人腿部设计.....	5
2.1.1 机器人步行的基本要求.....	5
2.1.2 机器人足部个数对性能的影响.....	5
2.1.3 机器人足部排列对性能的影响.....	6
2.2 六足机器人云台设计.....	7
2.3 六足机器人整体布局设计.....	8
2.4 本章小结.....	9
第 3 章 六足机器人动作设计.....	10
3.1 运动学模型.....	10
3.2 六足机器人步态规划.....	11
3.3 动作组设计.....	12
3.4 本章小结.....	13
第 4 章 六足机器人图传系统设计.....	14
4.1 Socket 通信原理.....	14
4.2 图传系统结构设计.....	16
4.3 图传系统服务器配置.....	17
4.4 图传系统客户端程序编写.....	17

4.5 本章小结.....	19
第 5 章 六足机器人视觉系统设计.....	20
5.1 直线与圆形识别.....	20
5.1.1 识别原理.....	20
5.1.2 函数应用.....	21
5.2 颜色识别.....	22
5.3 复杂目标识别.....	22
5.3.1 级联分类器的原理.....	22
5.3.2 级联分类器的训练.....	23
5.3.3 卷积神经网络与级联分类器的对比.....	23
5.4 本章小结.....	24
第 6 章 六足机器人控制系统设计.....	25
6.1 控制系统硬件设计.....	25
6.1.1 主控系统.....	25
6.1.2 运动执行器.....	26
6.1.3 环境与姿态感知器.....	28
6.1.4 辅助遥控器设计.....	29
6.2 控制系统软件设计.....	30
6.2.1 系统整体控制逻辑设计.....	30
6.2.2 运动控制器设计.....	31
6.3 本章小结.....	33
第 7 章 总结与展望.....	34
7.1 总结.....	34
7.2 展望.....	35
参考文献.....	36

第 1 章 绪论

1.1 六足机器人研究背景

在当今社会，机器人已经被广泛应用于生产生活的各个环节。随着科技的发展，机器人的应用场景已经不再局限于常规条件与环境，而是更多的趋向诸如灾情搜救、地貌勘探、资源开采等环境复杂条件恶劣的场景。传统机器人中，轮式机器人控制结构简单，在良好环境下运行快速稳定，但在复杂与具有干扰的环境中适应性差，速度与稳定性均表现不佳且耗能较大。履带机器人在任何环境中运行都较为稳定，但无法满足需要快速反应与自我调整的应用需求。相比于传统的轮式机器人与履带机器人，足式机器人能实时调整自己的姿态保证重心与位置的稳定，具有更高的稳定性与机动性。足式机器人有二足、四足、六足、八足等多种形态。综合稳定性承载性与结构复杂度考虑，六足机器人是应对复杂环境的最佳足式机器人构型。

六足机器人还具有运动轨迹离散化、自由度高、底盘位置高等独特的优点。六足机器人的足位置分布通常采用仿六足昆虫的排布与运动形式。对于六足机器人，国内外已经在结构设计、协同控制、步态选择等方面取得了许多突破性进展并实现了六足机器人的仿生运动与初步应用，但仍有诸如动作机械，自适应能力有待提高等问题尚待解决。六足机器人作为机器人领域的研究热点，其在恶劣环境探测、军事运输、资源开采等领域都有着广阔的应用前景。因此在这种现实背景下，进行六足机器人的研究无疑是极具实际意义与未来发展前景的。

1.2 六足机器人发展历程

20 世纪 60 年代初，仿生学（Bion-ics）诞生。在这门学科中，人们研究生物结构工作的原理并根据这些原理发明出新的设备、工具和科技。仿生学现在已经与多种领域结合，将大自然的演化中的优秀设计应用到了人类的生产生活中。Robert MC Ghee 等通过模拟昆虫的行为模式，设计出了全球第一个六足机器人 OSU^[1]。这是现代仿生步行机器人发展的重要转折点之一，为六足机器人后续的

发展奠定了良好的基础。伴随着太空航行的兴起,一批以星球探测为目的的六足机器人相继诞生。1989年,第一个智能化的仿昆虫机器人 Genghis 研制完成^[2]。此机器人拥有二自由度的腿部,通过共一百五十余个传感器可以实现简单的学习行为与避障能力。1990年,六足星球探测机器人 AMBLER 诞生^[3]。近年,NASA 旗下的喷气动力实验室(JPL)研制出了六足机器人 ATHLETE^[4]。其具有正六边形的整体结构,共有六条关节型腿,分别布置在六边形的六个拐角处。该机器人同时具有腿和轮,腿末端的轮可以保证优秀的通过能力并在平稳的地形上加速。ATHLETE 主要应用于登月的输送与勘测任务,其可以爬上 36° 的上坡,也可以完成平稳的下坡,同时还具有 15T 的载重能力。除了提高机器人的负载能力,通过设计轻量化使其运动能力增强也是六足机器人的关注点之一。C 形腿六足机器人 RHex 就是轻量化设计的代表^[5]。其具有优秀的地形适应性与较快的前进速度。其腿部采用的新设计使其在仅有一个自由度的情况下仍旧能具有优秀的性能。Rhex 改变了人们对六足机器人的刻板印象,开拓了六足机器人后续的设计思路与应用场景。ScienceParrot 团队在前者的基础上设计的六足机器人完全继承了 RHex 的优点。尾部设置的装置可以防止其向后倾倒。此装置与腿上的细小脚趾使得此机器人的上下坡能力极强,可以完成 55° 的陡坡上坡与 135° 的下坡。

我国对六足机器人的研究开始的相对较晚,从 20 世纪 80 年代末,清华大学等多所高校对其进行过深入研究。有仿蜘蛛、仿甲虫六足机器人等多项成果。北京航空航天大学与国外高校进行合作,研发出了 NOROS 机器人^[8]。这款机器人采用较为先进的轮足式结构,可以针对不同的工作环境进行足式与轮式的工作方式选择,仅需压低膝关节的角度,其关节下侧的轮接触到地面就可以实现轮足切换。轮足式结构能够有效适应月球表面的工作环境,此机器人后续也应用于月面探索中。祝捷及其团队尝试研制的记忆合金六足机器人是一次全新的尝试^[9]。此团队将传统应用于微执行器的记忆合金应用于六足机器人关节驱动,虽然只完成了直行而难以转向,但开拓了后续的新研究方向。同时,我国也拥有微型六足机器人的技术,在六足机器人的多项相关技术上均为世界一流水平。

1.3 六足机器人关键问题

1.3.1 步态规划

六足机器人的步态是指系统的迈步方式,具体来说即为六条足抬起与放下的控制逻辑。步态规划与协同控制直接影响着机器人的性能,因此步态规划是步行足式机器人最关键的技术之一。目前常用的步态有三角步态、四足步态与五足步态。三角步态是应用最频繁的步态^[10]。三角步态即是将6条足分为两组,[1, 4, 5]为A组,[2, 3, 6]为B组,通过“在A组迈腿行走时,B组当作三角形稳定支架;B组迈腿行走时,A组当三角形稳定支架”的方式来进行移动。三角步态的优点是操控逻辑简单、运行平稳、故障率低;缺点是只适用于平整、路况良好地面,对于复杂山地或多石泥泞地形适应性不强。四足步态需要将6条腿分为三组,第一组是1、5,第二组是2、6,第三组是3、4^[11]。在移动过程中第一组、第二组、第三组腿按顺序执行向前摆动。运动过程中始终有四个足接触地面,其稳定性与负载能力更强,相应的移动速度也更慢。五足步态则是五足接触地面,一足执行移动,其稳定性与负载能力最强,移动速度最慢^[12]。面对复杂的应用情景,还有斜坡步态与避障步态。为了克服斜坡的影响,李栓柱及其团队提出了通过改变关节角度提高稳定裕度的斜坡步态^[13]。常规的步态进行避障动作时都不够灵敏,刘连蕊及其团队提出了专用于避障的横向三角步态^[14],可以稳定的避开障碍物但灵活度较低。魏武等在横向三角步态的基础上提出了横向四角步态^[15],在保证稳定性的前提下拥有更高的灵活度。

1.3.2 障碍规避

障碍识别也是六足机器人的一项重要技术。机器人可以通过红外感应与远程操控来避障,但前者避障性能欠佳而后者则不适用于机器人独立作业的情况。学界尝试从多种不同方法来提高避障性能。Mohd 与其团队从视觉的角度上提出了一种避障算法^[16],但是由于信号传输时间与系统处理速度受限,实际性能并不令人满意。Choi 等尝试从激光识别角度入手^[17],达到了较高的识别精度,但对电能供给有较高的功率需求。Budiharto 及其团队设计的声控识别算法^[18]在室内或较安静的环境具有较高的准确性,但在开放性环境或高噪声干扰的环境中无法发

挥作用。在运动学规划、热成像识别等角度也有避障算法，均各有利弊，需要根据实际适用的环境来选取合适的避障算法。此外，随着设备性能的提高，以智能算法为核心的避障算法在未来或有较广阔的发展空间。

1.4 论文研究内容

本次毕业设计的主要研究内容是六足机器人控制系统设计。主旨是对六足机器人控制系统及扩展功能的研究。拟搭载常规的视觉识别追踪能力，并通过经由公网的图传及远程操控满足复杂情况下的遥控需求。主要研究内容如下：进行六足机器人机械结构与组装，确定其整体结构与足部结构的几何布置形式，使其能够稳定、高效的完成移动目标；分析六足机器人的运动控制原理，设计步态控制系统，编写移动指令；进行视觉识别并反馈到中心处理器，设计追踪算法；编写图传程序与上位机程序，配置服务器作为中转以实现通过公网、不受距离限制的图传功能；制作带显示的遥控器的电路图与 PCB 板以完成近距离状态监控与机器人操控；使用树莓派作为主控，完成机器人的整体控制逻辑并调试系统。技术内容主要分为五个部分：机器人结构设计、机器人动作设计、机器人通信系统设计、机器人视觉识别系统设计、机器人控制系统设计。

第2章 六足机器人结构设计

2.1 六足机器人腿部设计

足式机器人的腿的数量对机器人的性能具有很大的影响。单足、两组、四足、八足等机器人各自具有其优缺点与合适的应用场景，在研究时所侧重的方向也各不相同。另外，足部的排列位置也对机器人性能具有一定程度的影响。下面将从足数与足部排布方式对性能的影响作为出发点，对合理的足部数目进行探究。

2.1.1 机器人步行的基本要求

步行机器人的基本姿态应当分为行动态和静止态。一个实用的机器人不仅应当在行动态中保持稳定运行，还应当在静止态中也可以保证自身姿态的稳定。机器人如果需要在不进行任何控制的情况下保持自身稳定，则至少需要三条腿立足来保持自身的姿态。如果腿少于三条，则需要额外的控制程序来保持机器人的静止状态，这会增加机器人的控制成本；另外，在机器人的关机状态下其无法保持站立状态，这无疑是不便于实际使用的。

另外，步行机器人在运动过程中需要抬起自己的足部进行移动动作，因此在运动过程中会有至少一个足部无法起到支撑作用。在不增加额外的控制成本的前提下，至少需要四个足部才能保证机器人在静止态和行动态的基本稳定状态。

2.1.2 机器人足部个数对性能的影响

机器人在不同的足部个数情况下具有不同的步行稳定性和移动速度。负荷因子是机器人单个足部在周期内支撑时间与运动周期之比，当各腿的负荷因子相等时称为规则步态。负荷因子越小，机器人系统表现越稳定。当机器人工作在规则步态时，稳定裕度与负荷因子随腿的个数变化如图 2.1 所示^[19]。

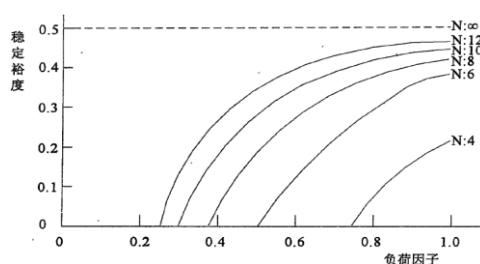


图 2.1 稳定裕度与负荷因子关系图

由上图可知,当 $N \geq 6$ 时,机器人在中低负荷因子下表现出较高的稳定裕度。从移动速度角度来考虑,如果以 U 表示机器人单足运动的最大速度, β 表示机器人稳定支撑的足部个数(最小为3)与机器人总足部个数的比值,则机器人的最大移动速度 V 可表示为:

$$V = U(1 - \beta)/\beta \quad (2-1)$$

由此可知当 $N = 4$ 时,最小 β 值为0.75,故最大移动速度为 $U/3$ 。而当 $N = 6$ 时,其最小 β 值为0.5,最大移动速度为 U ,步长与最大移动速度相等,足以满足大多数应用场景的需求。

另外,当机器人的足部个数增多时,系统的复杂度以及制作成本会极大升高,这意味着机器人需要更精确的控制系统和更快的反应速度。除此以外,还需要考虑多个关节驱动器进行协同驱动时带来的延时问题。

综合机器人的基本需求、系统性能以及制作性价比考虑,六足机器人在大多数情况是结构设计的最佳选择。

2.1.3 机器人足部排列对性能的影响

六足机器人常见的足部排列位置有圆形、椭圆形、矩形三种排列方式,不同的排列方式对机器人的稳定性和运动能力具有不同的影响。三种不同排列方式的示意图如图2.2所示。

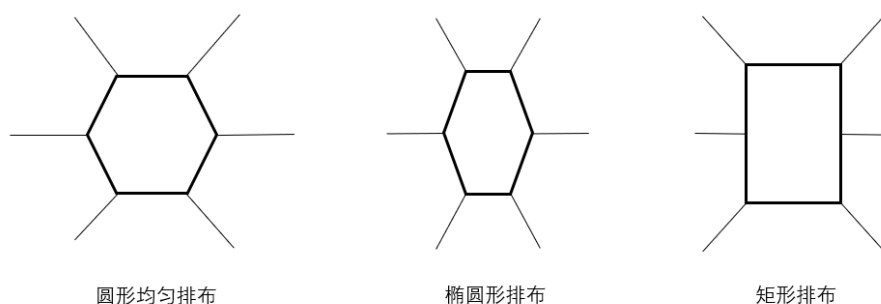


图 2.2 机器人足部排列位置示意图

在考虑六足机器人足部排列位置时主要需要关注两个指标:腿部运动空间重叠状态、直线前进的有效步行距离。腿部运动空间重叠会导致相邻的两条腿运动时产生干扰,即可能在运动时发生碰撞乃至卡位。解决运动空间重叠的方法主要有两个,一是限制足部的运动空间,从物理模式上使其不可能发生碰撞;二是标注重叠区域,在分析运动状态时着重对这些区域进行分析计算,这样可以设计出

性能最优的步态，但也会很大程度的增加运动计算的复杂度，因此在进行规划时希望腿部运动空间尽可能的不发生重叠。另外，直线前进的有效距离越大，机器人的运动能力越强，对外界可以更好的做出反应。

对运动空间重叠状态，圆形排布性能最好，椭圆形排布性能次之，矩形排布性能最差。对前进有效速度，矩形排布性能最好，椭圆形排布性能次之，圆形排布性能最差。综合两个指标考虑，椭圆形是综合性能最好的排布方式。

多足机器人的足部通常采用两段式设计。根据足部运动空间法向量与机器人前进方向的几何关系，足部排列形式又可以分为前后式与并列式。其侧面示意图如图 2.3 所示。

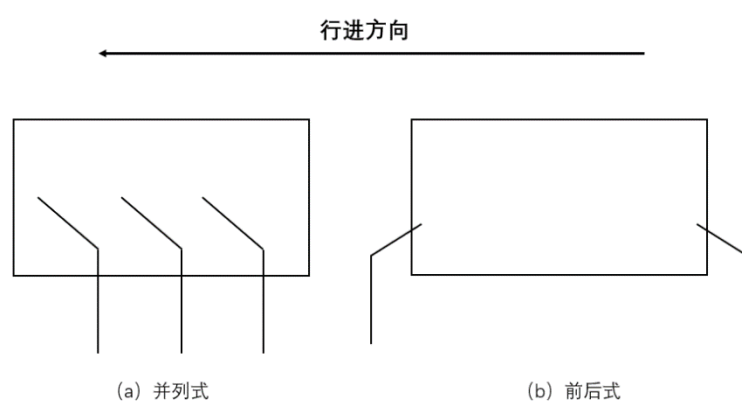


图 2.3 机器人足部排列方式示意图

图 2.3 (a) 展示的是并列式，腿的动作空间与机器人的整体行进方向垂直。图 2.3 (b) 展示的是前后式，腿的动作空间与机器人的整体行进方向平行。根据并列式与前后式的选择，机器人会工作在纵向前进与横向前进两种不同的状态，对应的步态设计原则也有很大不同。在实际应用中，并列式可以空出正前方的位置给传感器感知外部环境，对并列式的运动控制方案也相对更成熟。因此在大部分应用条件下都优先选择并列式排布。

根据上述原因，本设计采用六足椭圆并列式足部排布形式。这种排列形式具有综合性能优秀、稳定性高、控制方案相对简明等优点，有利于本设计的原理分析与功能实现。

2.2 六足机器人云台设计

云台即安装在摄像头支撑平台上的工作台，其连接摄像头与其支撑平台，并

使得摄像头可以相对于支撑平台进行垂直与水平运动。云台内部通常含有两个舵机或电机，分别负责垂直与水平方向的运动。

在本设计中，云台的运动驱动器采用 9G 舵机。云台的模型如图 2.4 所示。

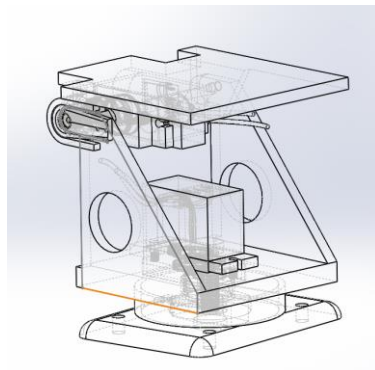


图 2.4 云台 3D 建模示意图

相对于电机的旋转，舵机可以直接运动到指定的目标位置。由于舵机的内部结构包含减速齿轮组，其速度通常慢于电机但可以提供更高的扭矩，更适合云台这种需要进行负载的应用场景。9G 舵机的驱动电压和电流都很低，可以不额外接入驱动而是直接连接在嵌入式设备上。面对小负载的应用场景具有极高的性价比。

在本设计的实际制作中，云台的结构件采用 PLA 材质的 3D 打印制作，下端使用螺丝螺母固定在机器人的顶板上，上端采用热熔胶与摄像头固定在一起，经测试可以实现云台的基本功能。

2.3 六足机器人整体布局设计

机器人的整体结构采用双层式结构。下层板与足部件采用金属结构件以保证能够承受舵机的应力与上层部件的负载，上层板与云台采用 PLA 材质的 3D 打印件以满足部件连接需求。

下层板上固定 32 路舵机控制板与其供电用电池。关节驱动舵机型号选择 MG996R，其扭矩性能远强于小型舵机 SG90 等型号，在满足性能要求的情况下性价比高。固定好以后将十八个舵机的地线、电源线与信号线全部接到下层板上。

上层板上固定树莓派与摄像头云台，其中摄像头固定在机器人上层板的头部。由于采用了椭圆式足排布，机器人头部中间处的位置在运动轨迹中很少被使用，

由此给予了摄像头充足的视野。两层板之间通过舵机标准件与轴承进行固定，通过杜邦线连接树莓派与舵机控制板进行信息交换。机器人的整体结构如图 2.5 所示。



图 2.5 机器人实物图

2.4 本章小结

本章中首先介绍了步行机器人结构的选择与优劣势，具体来说为足个数与足排列方式。本设计选择了六足椭圆并列式的设计方案，其具有综合性能优秀、稳定性高、控制方案相对简明等优点。随后介绍了云台的功能与实物实现，最后介绍了六足机器人整体部件布局设计并附上了机器人的实物图。

在机器人的实际运动中，足部对机器人的支撑力足够大，机器人重心的不平衡基本不会对机器人的运动产生影响。但由于经费有限，选用的 MG996R 舵机在定位上精准度仅能满足中低精确度控制需求。另外由于关节固定与配合上的非对称性，机器人在进行直线运动时会发生略微的偏移，在后续的控制系统中将介绍如何通过控制流程抑制偏移。

第 3 章 六足机器人动作设计

本设计共使用 18 个舵机，动作设计相当复杂。若使用实时姿态解算再决定每个关节的运动，其计算量过大且性能要求较高，故本设计采用动作组方案，通过调用不同的动作组执行对应的运动功能。设计动作组首先需要明确机器人的运动步态，随后根据运动学原理进行关节角解算。

3.1 运动学模型

对六足机器人的单个足部进行模型抽象，可以将其视作一个三自由度连杆进行分析。舵机的外部转动齿轮视为运动关节，连接结构件即可视作关节之间的连杆结构。其示意图如图 3.1 所示。



图 3.1 六足机器人足部结构示意图

对其进行运动学分析可以分为两个部分，从关节角解算末端位姿称作正运动学，从末端位姿解算关节角称作逆运动学。对于正运动学，常用 DH 坐标法进行计算，单足的 DH 坐标系如图 3.2 所示。

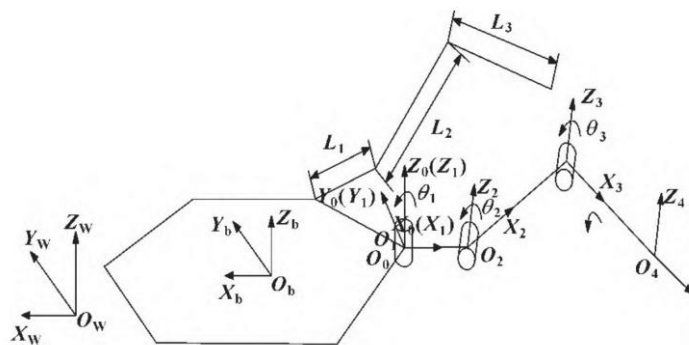


图 3.2 单足 DH 坐标系^[20]

表 1.符号说明

符号	意义
θ_n	X_{n-1} 绕 Z_{n-1} 旋转至与 X_n 的旋转角度
α_n	Z_{n-1} 绕 X_{n-1} 旋转至与 Z_n 的旋转角度
d_n	沿 Z_{n-1} 轴从 X_{n-1} 移动到 X_n 的距离
a_n	Z_{n-1} 与 Z_n 的垂线距离

表 2.DH 参数

n	α_n	a_n	d_n
1	90°	L_1	0
2	0°	L_2	0
3	0°	L_3	0

对于构型确定的机械结构进行分析时,其 DH 参数是可以确定的,如表 2 所示。在上述 DH 参数表中, L 表示每个连杆部分的长度。在进行分析时,由于足部有三个关节,相当于进行了三次线性变换。当前坐标系与下一坐标系之间的空间关系可以使用一个齐次变换矩阵 ${}_{n-1}^nA$ 进行描述:

$${}_{n-1}^nA = \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n & 0 & \alpha_{n-1} \\ \sin\theta_n\cos\alpha_{n-1} & \cos\theta_n\cos\alpha_{n-1} & -\sin\alpha_{n-1} & -\sin\alpha_{n-1}d_n \\ \sin\theta_n\sin\alpha_{n-1} & \cos\theta_n\sin\alpha_{n-1} & \cos\alpha_{n-1} & \cos\alpha_{n-1}d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$${}^0_3A = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A \quad (3-2)$$

经过三次矩阵线性变换后可以得出末端的位姿:

$$X = L_3\cos\theta_1\cos(\theta_2 + \theta_3) + L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_1\cos\theta_2 \quad (3-3)$$

$$Y = L_3\sin\theta_1\cos(\theta_2 + \theta_3) + L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_1\cos\theta_2 \quad (3-4)$$

$$Z = L_3\sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2\sin\theta_2 \quad (3-5)$$

在后续设计时,可以通过正运动学原理进行动作组设计的指导以确定机器人工作在设置动作时的姿态。逆运动学在本设计中应用较少,故在此不作赘述。

3.2 六足机器人步态规划

在进行六足机器人的步态规划时,除去特殊的避障等特殊场景使用的步态,常用的步态有三角步态、四足步态、五足步态、波浪步态、跟导步态中。其中,来自于仿生学的三角步态因为其均衡的性能与较高的稳定性,成为最常用的六足机器人步态之一。三角步态拥有较高的稳定性,而在稳定裕度较高的三角、四足、五足步态中,三角步态的移动速度最快^[21]。另外,三角步态的控制设计也相对简

明，故本设计采用三角步态作为步态规划的基础方法。

三角步态的主要运动思路是将六个足按三角形分为两组，一组进行移动时另一组作为支撑。由于三角形结构具有稳定性，支撑组可以为机器人提供稳定的立足支点。三角步态的示意图如图 3.3 所示。

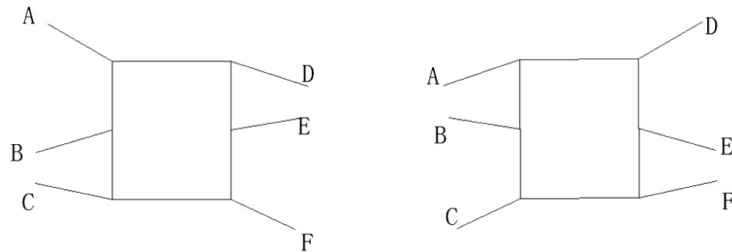


图 3.3 三角步态示意图

三角步态的主要动作为前进后退与左转右转，将在下面的动作组设计部分中进行详细介绍。在机器人执行各种动作时，其质心必须处在三角支撑足形成的空间区域范围以内，一旦超出范围机器人就会重心失稳。质心投影在地面的点距离支撑足构成的三角区域的边的最短距离称为稳定裕度。在常规情况下，稳定裕度越大，系统工作态下表现越稳定。只要机器人在行走过程中的质心垂直投影始终被其交替变化的立足点所组成的多边形所包围，就可以说它是静态稳定的^[22]。在动作组设计时必须按照保存静态稳定的原则来进行设计。

3.3 动作组设计

对于控制较为复杂的系统或控制器性能较弱的系统，对其每个运动关节进行实时控制显然是不现实的。在类似的情况下，动作组方案是采用最多的控制方案之一。通过对每个功能都设置一个或多个动作组，控制器在需要执行功能时不对机器人姿态进行实时解算而是调用预设的动作组按照一定逻辑进行运行，这样可以大大降低系统复杂度与控制难度。

在动作组设计时，需要将一个运动过程拆分为多个关键姿态，并使得系统在关键姿态中进行转换。为方便后续步态说明，本文假设一般情况下的六足机器人有前足 1、2，中足 3、4，后足 5、6。以直行为例，其主要可以拆分为六个关键动作。动作一是从初始姿态抬起 1、4、5 号足并在空中摆动；动作二是 2、3、6 号支撑足执行摆动；动作三是 1、4、5 号足放至地面上；动作四是 2、3、6 号足抬起并

在空中执行与动作二相反方向的摆动使得其回到一开始与机器人主体的相对位置；动作五是地面上的1、4、5号足执行与动作一相反方向的摆动；动作六为将2、3、6号足放下，此时机器人姿态与初始状态完全相同，可以直接进入下一循环。另外，在涉及到左右转时，通过调整其中的关键动作的幅度可以实现不同角度的转向以满足后续控制需求。本项目采用的主要执行器为MG996R舵机，其控制PWM的周期为20ms，占空比为2.5%时舵机工作在 0° 而占空比为12.5%时舵机工作在 180° ，在此范围内占空比与舵机具有线性关系。可以得出如下等式：

$$A = (H - 2.5\%) \times 18 \quad (3-6)$$

其中，用A表示舵机角度，H表示占空比。

通过需求角度可以很容易的解算出需要给出的PWM占空比，系统确定运动角度后向舵机发送不同占空比的PWM信号即可完成关节角控制。

通过设计运动过程中的关键动作可以使得运动过程运行在预设的方案下。对一个相同的运动过程，其设置的关键动作越多，此运动过程看起来便越流畅，机器人各足的运动轨迹也更加准确。虽然动作组在性能上天然性的不如实时控制，但是通过设置合理的关键动作也可以满足大多数的应用场景，是一种性价比较高的控制思路。

3.4 本章小结

本章首先介绍了机器人足部的运动学模型以及正运动学的DH坐标法解算，并介绍了常用的步态，在其中选择三角步态作为运动规划的基础方法。随后介绍了三角步态的过程及其稳定性分析。最后介绍了动作组控制方案的整体思路，并以直行功能作为例子说明了设置动作组关键动作的方法，阐述了如何根据动作对关节执行器，即舵机进行控制。

在机器人的实际应用中，实时姿态解算是效果最好的方法，但是其对控制器设计和主控硬件性能均有较高需求。在常规应用中，使用动作组控制方案并设置合理的关键动作即可满足大部分应用情况。另外在日后的研究中也将对机器人在高精度应用调节下的实时解算进行探究。

第4章 六足机器人图传系统设计

4.1 Socket 通信原理

TCP/IP 即传输控制协议，其定义了设备连接到互联网及数据传输的方式。TCP/IP 主要分为四个层次，分别是应用层、传输层、网络层、数据链路层。其中数据链路层为底层，应用层为顶层，上层建立在下层的基础之上。

Socket 通信，即套接字通信。它并非是 TCP/IP 的一个具体层次，而是应用层和传输层之间的抽象层。它把 TCP/IP 前三层的各种复杂操作与通信方式进行了收束，抽象为简单接口以供应用层调用^[23]。Socket 对象允许不同的计算机之间通过套接字进行双向数据传输。通过建立连接，Socket 通信可以采用 TCP 和 UDP 等不同的协议进行数据传输，以满足不同的需求。TCP 协议需要连接，其采用“三次握手”进行通信，速度较慢而准确度较高。UDP、ICMP 和 ARP 协议则不需要连接，传输速度较快但无法保证传输数据的准确性与完整度。

建立基于 TCP 的 Socket 通信并进行数据传输的流程如图 4.1 所示：

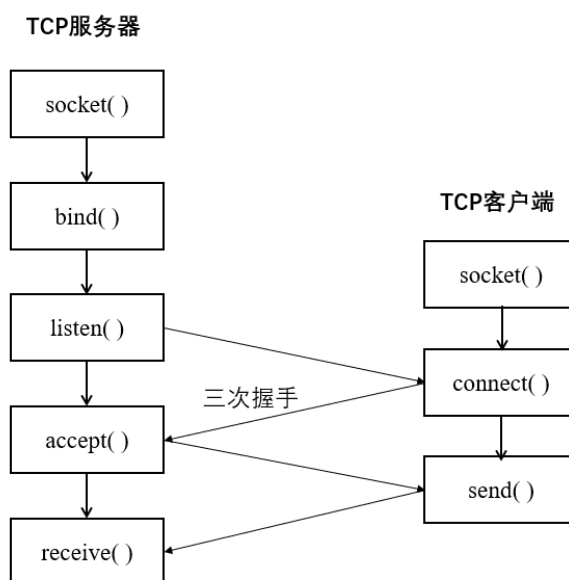


图 4.1 基于 TCP 的 socket 通信流程图

对一个完整的基于 TCP 的 Socket 通信流程有如下步骤：

1. 服务器根据 IP 地址类型与 socket 通信使用的协议与指标创建 socket 对象。
2. 绑定服务器使用的 IP 地址与对应的端口号。

3. 服务器开始进行监听客户端的请求。
4. 客户端根据 IP 地址类型与 socket 通信使用的协议与指标创建 socket 对象。
5. 客户端打开 socket 对象，根据设定的参数尝试连接服务器。
6. 服务器接收到客户端请求，同意与其进行连接。
7. 客户端发送信息，服务器端读取信息。
8. 双方在需要发送的信息发送完毕后关闭 socket 对象。

建立基于 UDP 的 Socket 通信并进行数据传输的流程如图 4.2 所示：

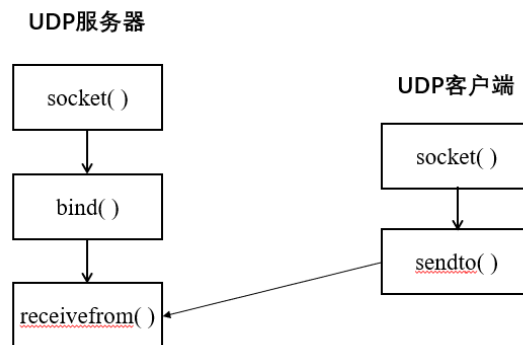


图 4.2 基于 UDP 的 socket 通信流程图

对一个基于 UDP 的 Socket 通信流程有如下步骤：

1. 服务器根据 IP 地址类型与 socket 通信使用的协议与指标创建 socket 对象。
2. 绑定服务器使用的 IP 地址与对应的端口号。
3. 服务器直接开始接收数据。
4. 客户端根据 IP 地址类型与 socket 通信使用的协议与指标创建 socket 对象。
5. 客户端发送信息到服务器对应的地址。

在基于 UDP 的 Socket 通信中，最显著的特点就是没有服务器与客户端的连接与接受步骤，取而代之的是每次发送信息都必须指定对方的地址与端口。此时通信过程中没有三次握手的校验，双方无法确认对方的信息接收状态。相对的，由于不需要反复确认，在同一段时间内可以传输的数据量也大幅增加。

另外，socket 通信的模式默认设置为阻塞模式，即 `accept` 直到客户端返回连接成功标志以后才开始接受下一个客户端的连接请求或接收完一段信息后才会接收下一段信息。在某些应用场景中也可以使用非阻塞模式来提高信息传输效率。

对需要高速通信的场合，UDP 协议具有 TCP 协议不可替代的速度优越性。

关于 UDP 发送时的数据丢失问题，在程序设计时可以通过软件手段进行一定的避免。通过手动设置校验等手段可以很大程度上增加 UDP 协议的可靠性。图传是一个数据传输速度作为第一指标的应用场景，因此本设计采用 UDP 协议进行 Socket 通信并且设计了数据校验手段以保证图像的完整性。

4.2 图传系统结构设计

在面对复杂或者恶劣条件的应用时，操作人无法观察环境信息，故需要图传系统传递周围环境的图像供操作人进行分析与决策。而操作人如果与机器人距离很远，则常规基于局域网、蓝牙等短距离通信手段会全部失效。基于以上应用场景，图传系统的目的是实现通过公网的图像传输，这种传输没有通信距离限制，只要连接互联网即可进行图像观察。

图传系统包括三方面的程序，即发送端、接收端与中转端。其信息中转方式采用基于 UDP 的 socket 通信。服务器采用了阿里云服务器，图传程序搭载于机器人的树莓派主控板上，可以实现通过公网的远距离图传。

三端之间的信息处理方式采用 opencv 库的编解码函数，将图像转换为一串字节进行传输。编解码函数支持 png、jpg 等格式，主要可以分为有损压缩与无损压缩两类。在本设计中为保证图传效果的流畅，采用有损压缩 jpg 格式，在保证图像清晰度的情况下具有更小的体积，可以更好的保证图传的流程性。整体图传系统的流程图如图 4.3 所示。

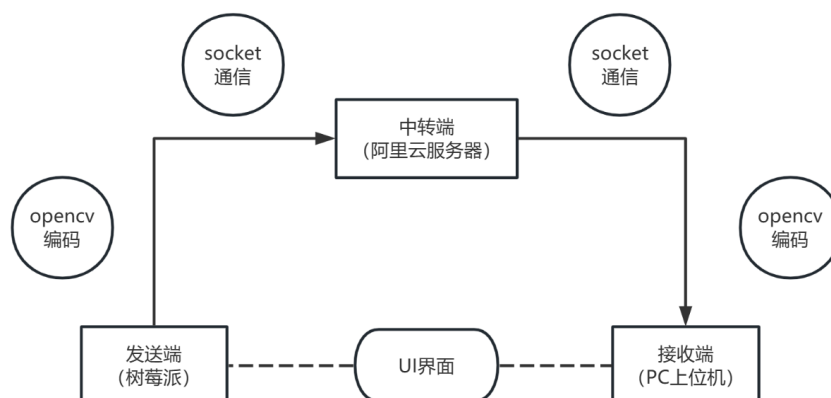


图 4.3 图传程序流程图

4.3 图传系统服务器配置

图传系统的中转服务器采用阿里云服务器，其具有公网 IP 可供连接。在配置服务器时装载了 CentOS 系统，并在其基础上加装了可视化操作界面宝塔面板。在服务器系统上装载了 python 3.9 版本，并在防火墙上开放了准备使用的端口号，配置安全组开放使得外部连接可以访问到对应的服务器端口。

服务器上不间断运行了图传中转程序，可以实时实现数据交换，其具体实现主要分为发送部分与接收部分两个部分。对于接收部分，当接收到图传设备，即树莓派的开始发送标志位字节 ‘up’，即开始执行接收程序。首先接收图像字节串总长度，随后开始接收图像字节串。如果经对比，接收到的图像字节串长度小于一开始接收到的字节串总长度的 70%，则视为图像损坏。仅将接收到的完好图像进行 opencv 的解码，保存为图像格式。采用这个验证策略可以一定程度上避免发送端由于网络波动使得字节串丢包的问题，提高图像传输的效率与完整度。对发送部分，接收到显示设备发送标志位字节 ‘down’，通过 recvfrom() 函数读取标志位的同时获取发送端的 IP 与端口，再将存储在服务器上的图片进行编码传输到客户端对应地址。

服务器端的程序编写了发送部分与接收部分多线程，可以同时进行发送与接收而不会产生程序上的延迟。另外，对图片字节串变量设置了互斥锁。由于线程之间没有优先顺序关系而是随机进行变量调度，若多线程同时操纵一个变量，此变量的变化将无法预期，会造成输出结果的混乱，这种情况被称为不安全线程。在设置互斥锁以后，同一变量在一个线程对其需求结束以后才会允许另一个线程对其进行改变，由此可以增加可控性，保证了图像的质量。

另外，在本设计中由于经费有限，使用的服务器带宽较小，图传的帧率相对较低，大约在 12-15 帧/秒。如果使用带宽更大、连接更稳定的服务器，可以有效增加图传的帧率与图像质量。

4.4 图传系统客户端程序编写

图传程序主要也分为发送与接收部分两个部分，另外在设计时将发送与接收部分合并到了一个多线程程序中并使用 tkinter 编写了 UI 界面，可以直观的进行

图像的接收与发送。客户端程序的 UI 界面如图 4.4 所示，其接收窗口实际运行效果如图 4.5 所示。



图 4.4 客户端程序 UI 界面展示图



图 4.5 客户端程序效果图

发送部分在捕获到摄像头接收到的图像以后对其进行编码，向服务器程序发送上传标志位 ‘up’ 后将图像字节串与其应有长度传输到服务器。接收部分工作时向服务器发送下载标志位 ‘down’，接收到字节串与其应有长度以后解码并进行验证，若接收到的字节串长度小于首先接收到的字节串应有长度的 70%，则认为此帧图像在传输过程中损坏。仅将传输成功的图像作为 jpg 文件覆盖式的保存到本地，即不断对本地图像进行刷新。

tkinter 是 python 自带的标准 GUI 库，其具有多平台兼容的特点。另外，由于 python 的近期版本全部集成了 tkinter，其在所有 python 环境中不需要其他任何依赖即可进行运行。本设计使用 tkinter 进行了客户端程序的编写，实现切换上传摄像头编号的功能，并进行了多线程程序设计，UI 与发送、接收运行在不同线程中从而使得功能不会互相干扰，发送与接收功能可以同时进行。经由 UI 界

面可以直观的进行图像的接收与发送。

4.5 本章小结

本章介绍了 `socket` 通信的基本原理、机器人图传程序的整体设计方案与其技术细节的实现方法。本设计使用了基于 `UDP` 协议的 `socket` 通信作为通信方式，`opencv` 进行图像的编解码，配置了服务器并设置了多线程与验证机制保证图传质量，并且设计了客户端 `UI` 使得程序更加简单易用。另外，在介绍过程中附上了图传系统的实机运行图片。

虽然本设计采用了复数方案尽量保证图像的完整性，但由于中转服务器的带宽较小且公网时有网络波动，图像的传输有时还是会出现卡顿的现象。如果换用高带宽或者专线连接的服务器，图像的传输质量可以得到相当程度的提高。

第5章 六足机器人视觉系统设计

当六足机器人工作于离线状态或操纵者操纵效果较差时，其需要自主对环境进行视觉感知并进行目标追踪等任务。本设计基于目标追踪任务，根据追踪的目标种类设计了对应的追踪方案，其示意图如图 5.1 所示。接下来将对每个方案进行详细的分析与介绍。

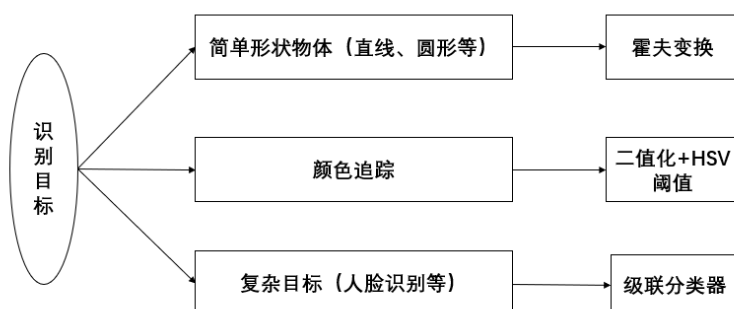


图 5.1 机器人视觉系统流程图

5.1 直线与圆形识别

5.1.1 识别原理

在常规的平面直角坐标系即笛卡尔坐标系，直线可以使用斜截式 $y = kx + b$ 来表示，而这样一条直线在霍夫坐标系中表示为一个坐标为 (k, b) 的点。笛卡尔坐标系中的一条直线对应霍夫坐标系中的一个点。而如果是笛卡尔坐标系中的一个定点 (x', y') ，经过变换以后对应霍夫坐标系中的一条 $q = -x'k + y'$ 的直线，故笛卡尔坐标中的一个点对应霍夫坐标系中的一条直线。

如果在笛卡尔坐标系中有三点共线，那么其对应的霍夫变换的三条直线一定交于一点，这一点所映射的笛卡尔坐标系直线就是三点所共的直线。如果是笛卡尔坐标系中的多个点，其对应不止一条直线，则霍夫变换认为在霍夫坐标系中最多直线的共交点为目标点或超过阈值数量的直线交点为目标点，此点对应笛卡尔直线，而这种直线可能不止一条。如果笛卡尔坐标系中的点在一条竖直线上，此时 k 为 $+\infty$ ，不便于表示。此时可以使用类似于极坐标系的换元，将 x 换元为 $\rho \cos \theta$ ，将 y 换元为 $\rho \sin \theta$ 。此时霍夫坐标系的两个参数为 ρ 和 θ ，更便于表示竖直线。此时

一个定点在霍夫坐标系中映射一条曲线，而曲线的交点仍旧唯一确定一条笛卡尔坐标系的直线，直线拟合的整体逻辑于换元前完全一致。

在笛卡尔坐标系中，圆的标准方程为 $(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$ ，将这个式子转换到三维霍夫坐标系中即为 (a, b, r) 。在三维霍夫坐标系中，一个点可以唯一确定一个笛卡尔坐标系中的圆，一个笛卡尔坐标系中经过定点的所有圆映射到霍夫坐标系中即为一条曲线。超过阈值数量的曲线交与一个点，则认为这个点是所求目标点，其对应笛卡尔坐标系中拟合出的圆。

`opencv` 在进行霍夫圆变换的实现时进行了优化。标准霍夫圆变换使用的是三维坐标系，相比使用二维坐标系的霍夫线变换需要耗费更多的时间与资源。`opencv` 使用了霍夫梯度法，其检测思路是去遍历所有非零点可能对应的圆心。圆心一定在圆上的每个点的模向量上，即在垂直于该点并且经过该点的切线的垂直线上^[24]。根据遍历可能的圆心上模向量相交数量是否大于阈值进行最终的判断。

5.1.2 函数应用

`opencv` 的霍夫变换函数返回一个二值数组，即上文原理部分提及的换元后参数 ρ 和 θ 。函数的传入参数有四个。第一个参数是需要检测的二值化图像，这意味着在进行霍夫变换前需要对图像进行阈值二值化或边缘检测等预处理。第二个与第三个参数为 ρ 和 θ 的精度。最后一个参数为线上的点数阈值，即霍夫坐标系中直线交点的阈值数量。

霍夫圆变换函数返回圆心坐标与圆的半径，此函数对参数非常敏感，针对不同的应用场景必须进行调参。`opencv` 实现的霍夫圆变换函数具有八个参数，第一个为需要检测的灰度图像。第二个参数为使用的圆检测算法，目前仅有霍夫梯度法可选。第三个参数是分辨率的反比数值。第四个参数是两个圆心之间的最小距离，在这个距离内不会再进行圆形拟合。第五个参数是边缘检测的高阈值。第六个参数是点被认定为圆心所需的模向量相交数量阈值。第七个与第八个参数用于设定可以检测到的圆的最大最小半径。由于霍夫圆变换对图像的噪声敏感，通常在捕获图像后进行一次全图中值滤波，再进行灰度化，可以有效降低图像中的噪声。

在本设计中，首先将获取到的默认 BGR 格式图像转为 RGB 格式并进行一次

中值滤波,随后使用霍夫变换获取直线的参数。而使用霍夫圆变换后将获取到的半径最大的圆形作为检测目标进行参数返回,这样可以额外排除环境中除检测目标以外的干扰。

5.2 颜色识别

HSV 与 RGB 相同,也是一种三通道的颜色空间。RGB 使用的是红绿蓝三种基色的线性组合来表示所有颜色,适合显示系统。但由于人眼对三种基色感知的敏锐程度并不一样,对 RGB 颜色空间内的颜色,人眼很难对其进行直接分解。与之相比,使用色调、饱和度、明度的 HSV 颜色空间则更直观。色调确定基础颜色,饱和度和明度决定颜色明暗,更符合人眼的认知规律,因此在颜色识别领域,HSV 颜色空间应用的更加广泛。本设计的颜色识别实现也正是基于 HSV 颜色空间。

在进行颜色识别时,首先需要将 RGB 图像转换为 HSV 图像,然后对图像进行腐蚀操作。腐蚀操作会将卷积核经过待处理图像,在卷积核覆盖的像素点中寻找最小像素值并替换锚点位置的像素值,直观的表现就是使得图像变瘦且消除噪声。随后进行二值化操作,这也是颜色识别实现的核心步骤。将原图的三个通道均设上下两阈值,仅有全部在阈值之间的像素点被转为纯白色,其他点被转为纯黑色,这步操作完成了目标颜色的提取与图像的二值化。接下来提取目标的外边界,绘制外接矩形,根据矩形的四个端点位置可以很容易的求出矩形的中心点位置,经由上述操作即完成了对颜色目标的定位。

5.3 复杂目标识别

5.3.1 级联分类器的原理

在计算机视觉中使用级联分类器,除了能快速地检测识别目标外,还能对检测到的目标进行学习^[24]。级联分类器目前支持使用 haar 特征、LBP 特征与 HOG 特征进行目标检测。在最佳特征选择时使用 Adaboost 算法进行训练,将对所有待训练特征投放训练图像,对于每个特征,都会产生一个最佳阈值。此阈值会将图像按照是否是目标物体分为两类,由此获得一部分分类错误率最低的特征。在

具体训练的过程中,依照实际应用情景,每张投放图像正确率的权重也可能不一样。此时获得的特征属于弱分类器,这些弱分类器不能单独对图像进行分类,而是需要和其他特征配合形成强分类器进行工作。

对每张图片直接使用所有的弱分类器进行识别无疑是耗费时间与资源的。级联分类器采用了级联的思路,将弱分类器划分为几个阶段,只有通过了前面的阶段才能进入下一阶段。靠前阶段的弱分类器通常数量较少且功能简单,这样对非目标图像的剔除仅需耗费第一层弱分类器使用的极少资源,对疑似目标和正确目标也不会损失检测功能。在检测特征时常变化的目标时,系统需要积极预测可能产生的新特征,并进行针对性学习与训练^[26]。

5.3.2 级联分类器的训练

opencv 提供了预训练好的关于人脸特征等目标的级联分类器。在实际使用时,使用者也可以训练自己的级联分类器。

首先准备好检测目标的正负样本。正样本可以是标记好待检测目标的图像,也可以是单纯包含待检测目标的图像。前者用于目标检测,后者用于目标分类。负样本是不包含检测目标的任意图片。本设计中使用采集到的人正脸图像作为正样本,较为空旷且无人的教室场景作为负样本。

随后生成描述文件,包含了样本的图像尺寸与正负信息。采用 opencv 提供的 `opencv_createsamples` 工具生成 VEC 文件并合并至一个总样本的 VEC 文件中。

最后,使用 `opencv_traincascade` 进行级联分类器的训练,生成一个包含分类器参数的 XML 文件。当需要识别时,使用 API 调用 XML 文件即可生成训练好的分类器并进行实时检测。

5.3.3 卷积神经网络与级联分类器的对比

级联分类器实际上是一种基于传统机器学习的目标检测方法。相比于目前广泛应用于模式识别领域的各种卷积神经网络,级联分类器的检测准确率相对较低,但其训练成本、模型大小与检测速度都要更快。在实际测试中,运行在树莓派上的人脸目标级联分类器可以达到每秒 20-30 帧,而训练好的 yolov5 网络每秒仅有 5-6 帧。后续测试更换了更轻量化的 MobileNet,但帧数仍旧只有级联分类

器的一半左右并且占用了绝大部分的 CPU 资源。不仅会使得检测数据的实时性变差，还会影响到图传等其他功能程序的运行效率。除此以外，由于检测目标复杂度并不高，级联分类器与神经网络的准确度差距仅有 5-8%左右。由此可见在算力不足的嵌入式设备上检测非过度复杂目标时，使用基于传统机器学习的级联分类器等方法相比卷积神经网络具有更高的性价比。

5.4 本章小结

本章介绍了机器人视觉识别系统的组成。对直线与圆进行检测使用霍夫变换，对颜色目标进行检测使用 HSV 空间阈值，对复杂目标进行检测使用级联分类器。并对以上方法的原理进行了介绍与分析。最后对级联分类器与卷积神经网络的性能与实际表现进行了对比，得出了在算力不足的嵌入式设备上检测非过度复杂目标时，使用基于传统机器学习的级联分类器等方法相比卷积神经网络具有更高的性价比的结论。

本设计的主控采用的树莓派 4B 算力仍旧有限，如果采用算力更高的 Jetson Nano 作为主控，其算力足够支持轻量级卷积神经网络的流畅运行，在进行复杂目标检测时会具有更高的准确度。另外，采用分立节点进行工作，将目标检测任务交由上位机进行也可以提高准确度与运行速度，但这种方法并不符合本设计的设计思路与应用场景。

第 6 章 六足机器人控制系统设计

六足机器人各种功能的实现系统是一个逻辑比较复杂的系统，本系统设计了三种不同的模式，经主控处理后得到机器人需要执行的动作。主控将动作指令发送给辅助控制器，即舵机控制板；辅控读取指令对应的动作组，向舵机发送 PWM 使其转至对应位置执行动作。系统框图如图 6.1 所示。

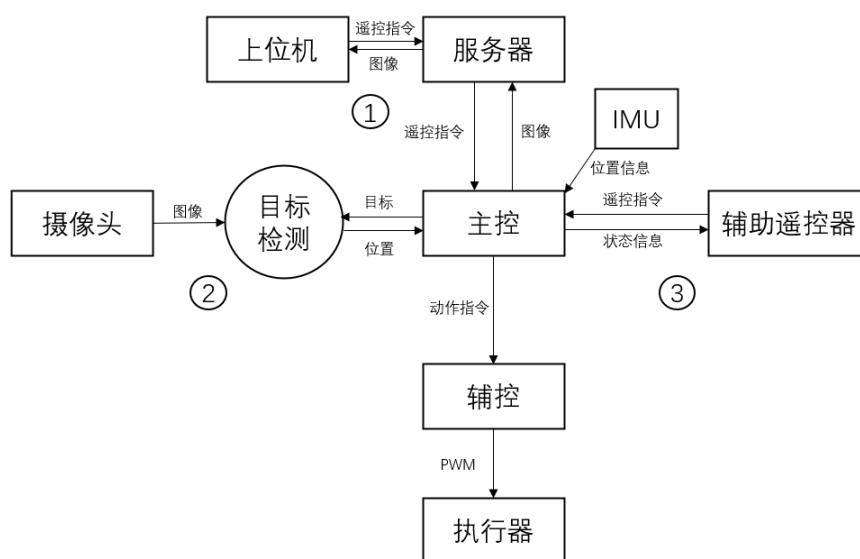


图 6.1 机器人控制系统框图

6.1 控制系统硬件设计

6.1.1 主控系统

本设计采用树莓派 4B 作为主控板进行大部分功能的运行，其实物图如图 6.2 所示。选择树莓派作为主控的原因主要是其片上资源丰富，自带 WIFI 与蓝牙功能，算力强于传统嵌入式设备且支持 linux 系统与 python 编程。



图 6.2 树莓派实物图

树莓派 4B 的主要片上资源与功能如下：

1. 硬件部分

- (1) 四核 64 位 ARM Cortex A72（运行频率 1.5GHz）作为 CPU
- (2) 8GB LPDDR4 RAM 选项
- (3) H.265（HEVC）硬件解码（最高可达 4Kp60）与 H.264 硬件解码（最高 1080p60）
- (4) 2 个微型 HDMI 端口，支持高达 4Kp60 的双 HDMI 显示输出
- (5) 可连接 802.11 b/g/n/ac 无线局域网
- (6) 包含 BLE 模块的蓝牙 5.0
- (7) 2 个 USB2 端口与 2 个 USB3 端口
- (8) 1 个千兆以太网端口（支持带有附加 PoE HAT 的 PoE）
- (9) 1 个 Raspberry Pi 摄像头端口（双通道 MIPI CSI）与 1 个 Raspberry Pi 显示端口（双通道 MIPI DSI）

2. GPIO 支持功能，其中大部分 GPIO 支持功能复用

- (1) 最多 6 个 UART，支持目前所有常用的波特率
- (2) 最多 6 个 I2C 且可以自定义频率
- (3) 最多 5 个 SPI 且可以自定义频率
- (4) 1x SDIO 接口，1x DPI（并行 RGB 显示器），1 个 PCM
- (5) 4 个硬件 PWM 通道，几乎所有 GPIO 都可以实现软件 PWM

树莓派作为主控需要实现的具体功能主要有以下几项：作为图传的发送端进行图像捕获、图像编码与发送；接收服务器标志位并进行动作组调用；进行自主视觉识别并输出目标位置；接收 IMU 数据并进行方向校正。

6.1.2 运动执行器

机器人需要进行运动的主要部位是足部和云台，这两部分的执行器选择不同，下面将详细介绍运动执行器的选择原则与性能。

1. 足部运动执行器

机器人的每个足均为三自由度，需要三个舵机进行控制，故机器人整机共需要 18 个舵机。出于性价比考虑，本设计选择 MG996R 舵机作为足部关节运动执

行器，其实物图如图 6.3 所示。



图 6.3 MG996R 舵机实物图

MG996R 是金属制齿轮模拟舵机，重量为 55 克。模拟舵机内部全部由模拟电路组成，需要一直发送控制信号才能转动至目标位置。此舵机的工作电压是 3-6V。在无负载的情况下，提供 4.8V 的电压，其反应转速可以达到 1.02 秒旋转一周；如果提供 6V 电压，则仅需 0.78 秒即可旋转一周。其工作死区为 4 微秒，工作扭矩是 13KG/cm。

舵机主要是工作于堵转状态下以提供固定姿态的扭矩，而堵转状态下的工作电流很大，可以达到 1.5A 左右，对整机来说 18 个舵机则需要非常大的电流进行供电。单片机无法提供如此大量的电流，故本设计采用 32 路 PWM 舵机控制板进行功能实现与控制。

此舵机控制板基于 STM32F103 开发，主控仅向舵机控制板发送控制信息，舵机供电能源来自与控制板连接的可充电锂电池。舵机的控制方式基于 PWM，即脉宽调制，其具体原理在此不作赘述。舵机控制板接收到主控板，即树莓派的控制信息后可以输出不同占空比的 PWM 调整舵机角度。可以通过指令实现实时控制，也可以调用预设的舵机动作组。其实物图如图 6.4 所示。

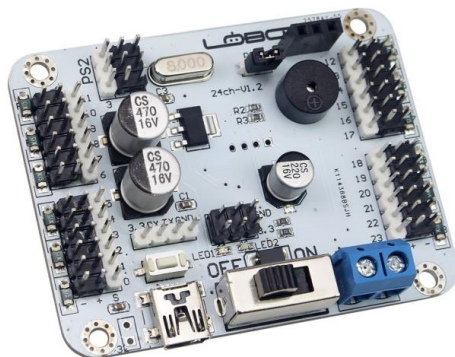


图 6.4 舵机控制板实物图

本设计中由于系统复杂度过高，实时控制实现很困难，故采用接收指令后执行预设动作组的控制方案。

2. 云台运动执行器

云台的运动包含二自由度，需要两个舵机进行控制。另外，云台对轻便性的要求较高且需要实时控制运动，最优控制方案是不需要经过中转就可以直接由主控板进行供电与控制。基于以上原则，本设计选择 9G 舵机作为云台运动执行器，其实物图如图 6.5 所示。



图 6.5 9G 舵机实物图

9G 舵机是塑料齿轮模拟舵机，重量为 9 克。此舵机的工作电压是 4.8V 到 6V DC，在提供 4.8V 的电压且无负载的情况下，其仅需 0.54 秒即可旋转一周。其工作扭矩为 1.6KG/cm，工作电流为 80-100mA。由于其工作电流相较于 MG996R 等金属齿轮舵机小的多，主控树莓派可以直接给其供电并进行控制，这样就保证了控制的延迟小、即时性高，符合云台的性能要求。

6.1.3 环境与姿态感知器

六足机器人在工作时需要对外界的环境与自身的姿态进行感知，依照获取的数据进行运动策略的调整。本设计采用摄像头进行外界环境的感知，其主要功能为图传和常规对象的自主识别定位，其原理如前文所述。对机器人的自身姿态，本设计选用型号为 JY901B 的 IMU 进行感知，其实物图如图 6.6 所示。



图 6.6 JY901B 实物图

JY901B 作为九轴 IMU 模块，集成了三轴陀螺仪、三轴加速度计与三轴地磁场传感器，采用内置的动力学解算与卡尔曼动态滤波，能够快速求解出模块当前

的实时运动姿态。由于加入了地磁传感器，其可以解决常规六轴 IMU 模块常出现的 Z 轴航向角漂移问题。此模块支持串口和 IIC 两种数字接口，在本设计中选择串口通信作为数据交换方式。上位机对 JY901B 使用的通信协议进行解析，在识别帧头与信息标识位后提取其中的位姿信息即可获得九轴原始数据与欧拉角、四元数等处理后的姿态数据。

由于制作与设计中的多种原因，机器人的机械结构不完全对称。利用 IMU 模块进行机器人的 Z 轴姿态检测可以使得其运动方向更加准确，后续通过闭环控制即可修正机械结构不完全对称造成的运动误差。

6.1.4 辅助遥控器设计

在机器人的实际应用中可能会遇到在无网络的离线情况下无法进行操控与状态监控的问题，在本设计中针对这种问题设计了辅助遥控器，在一定程度上可以解决上述问题。本遥控器采用采用 ESP32-WROOM 模组作为主控。此款模组的核心是 ESP32-D0WDQ6 芯片，其集成了传统蓝牙、低功耗蓝牙和 WIFI。其中 WIFI 使用的协议是 802.11 b/g/n 协议。ESP32 还集成了丰富的外设，包括高速 SDIO/SPI、UART、I2S 和 I2C 等。

遥控器的 PCB 设计图如图 6.7 所示。

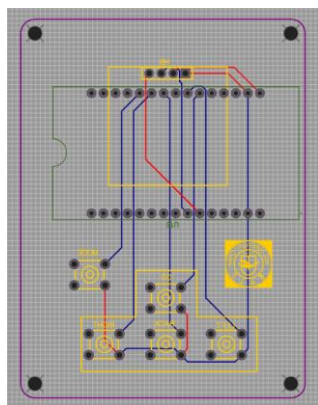


图 6.7 遥控器 PCB 设计图

当遥控器工作在离线遥控模式下时，ESP32 采用 STA 模式，机器人在连接不到公网时会自动连接到 ESP32 的 WIFI 下，此时通过局域网向机器人发出指令，遥控机器人运动并在接收回传数据后通过 OLED 屏幕显示机器人工作状态，同时实现操纵与状态监控。另外，除了前后左右的方向键，按下遥控器上的 MODE

键可以实现模式内部的功能切换，如切换目标追踪的目标。按下 MODE 键五秒后可以在遥控与自主目标追踪之间切换机器人的工作模式。

6.2 控制系统软件设计

6.2.1 系统整体控制逻辑设计

机器人共设计三个工作模式。模式一为公网图传遥控模式，模式二为自主目标追踪模式，模式三为局域网遥控器操控模式。其中，模式一可以切换到模式二，模式三也可以切换到模式二，但模式一、三不能互相切换。其逻辑示意图如图 6.8 所示。

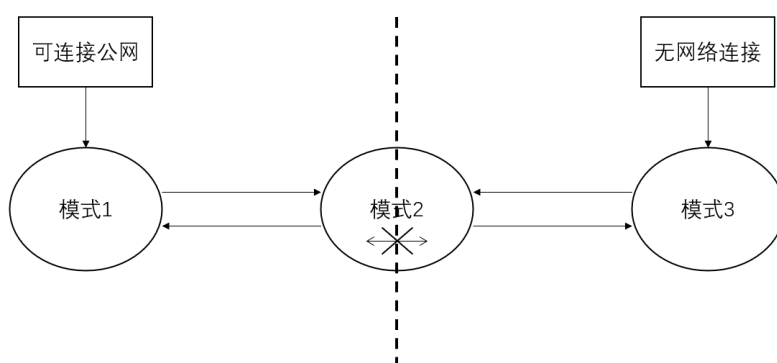


图 6.8 机器人工作模式示意图

在机器人工作在模式一，即公网模式时，上位机经由服务器向机器人发送操纵指令，其功能实现方式与图传程序类似。本设计为上位机操控程序编写了 UI 界面以便于操纵，其实机运行图如图 6.9 所示。

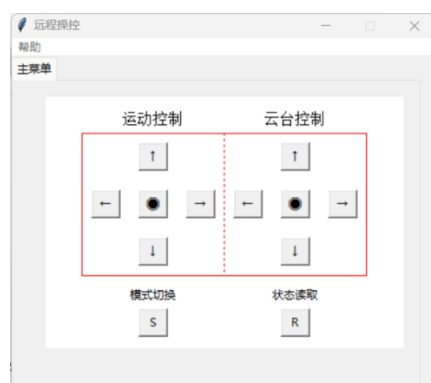


图 6.9 上位机遥控程序效果图

上位机进行操纵，树莓派上的操控程序接收到来自服务器的标志位，即对串口发送对应指令操纵舵机控制板执行对应动作组或对云台舵机的 PWM 进行调

整实现云台转向。另外，通过模式切换按钮也可以实现模式一与模式二的转换。

在公网断开时，树莓派会依照 config 文件中预设的第二 WIFI 信息连接尝试连接遥控器热点。在无公网条件下，主程序 socket 通信无法连接服务器，在报错后异常处理程序捕获错误，主程序进入模式 3 从而受到遥控器操纵，由此实现自动模式转换的功能。

6.2.2 运动控制器设计

常规的运动控制多采用 PID 算法进行控制，但本设计的运动方案是基于动作组进行运动，其转向角度并非任意角度，并不适合使用 PID 算法。本设计的运动控制思路是根据 IMU 反馈回的 Z 轴角度进行自设计的简单闭环控制。JY901B 模块由于使用了地磁传感器，其反馈的 Z 轴航向角是相对于绝对坐标系的角。将开机反馈回的第一个角度记录并作为机器人的初始角度，通过后续反馈的角度与初始角度进行计算可以获取机器人转向的角度。在进行遥控时，转向指令直接执行动作组即可，不需要设置控制器。而遥控进行直行时由于机械结构不对称，运动轨迹可能产生偏差，此时需要设计运动校正控制器。另外，在进行目标追踪时，也需要进行运动控制器设计。

在直行指令发出时，首先记录此时机器人的方向角。设置方向角 $\pm 3^\circ$ 作为死区，机器人在此角度内部则不进行校正。若偏差超过死区角度并在 $\pm 10^\circ$ 范围内，则采用左右转 5° 的动作进行校正。若偏差超过 $\pm 10^\circ$ 则采用左右转 10° 的动作进行校正。通常进行一次大幅度转向后即可进入微调范围内。通过这种策略可以一定程度上的保证执行直行指令的方向保证向前。在实际测试中，机器人的直行校正效果图如图 6.10 所示。



图 6.10 直行校正实际效果图

由于实验场地的地板为瓷砖材质，摩擦力较小，机器人的直行偏移也会相应

的变大，对校正机制的效果也体现的更加明显。

当进行目标识别时，首先需要校正云台与机器人身体的相对位置。当云台识别到目标时，读取云台的相对角度。随后将云台位置回中，机器人向对应方向转向，若未识别目标则在左右 15° 的范围内转向查看，若仍旧未识别到目标则视为目标丢失。若识别到目标，则向读取目标中心位置与画面中线的相对位置。本设计使用的摄像头的像素为 1080×1920 ，若目标中心的横坐标位置在 960 ± 100 以内，则视为目标在死区角度以内，直接执行直行指令。若目标偏移出指定位置，则执行左右转的指令使得目标回到死区以内后再执行直行动作。在实际测试中，机器人能够较为精准的追踪到目标方向，其实际效果演示如图 6.11 所示。



图 6.11 目标追踪实际效果图

运动控制系统的整体逻辑图如图 6.12 所示。

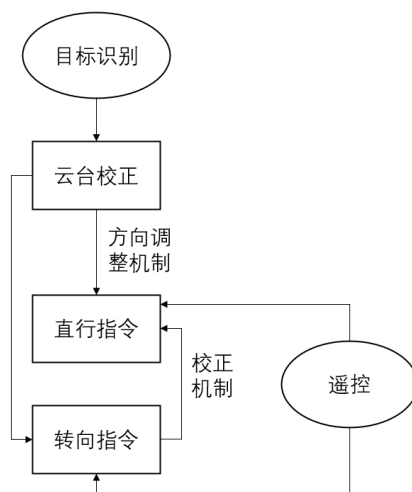


图 6.12 运动控制程序整体流程图

通过以上控制机制即可使得机器人能够校正自身方向，通过闭环控制实现目标追踪功能。

6.3 本章小结

本章介绍了机器人控制系统的设计。首先介绍了控制系统的整体逻辑，随后介绍了控制系统选择的主控、辅助控制器、执行器、感知器的硬件型号、性能及特点并补充说明了在离线条件下使用遥控器进行控制的策略及遥控器的设计方案。最后介绍了系统整体运行的逻辑及执行运动指令时的控制校正机制，并说明了在目标追踪时执行的基本控制流程。通过以上介绍对整个控制系统及其技术细节进行了系统化的说明。

关于运动控制所使用的算法，常规使用的 PID 算法对本设计使用的动作组运动方案并不适用，故重新设计了一套相对较简单的闭环控制方案，此方案在实际测试的大部分场景下可以完成本设计的性能目标。

第7章 总结与展望

7.1 总结

本文的研究内容主要是六足机器人及其控制系统，主要分为五个部分：机器人结构设计、机器人动作设计、机器人通信系统设计、机器人视觉识别系统设计、机器人控制系统设计。各部分具体内容如下：

1. 机器人结构设计。介绍了步行机器人结构的可选方案，包括足个数与足排列方式。将各种结构进行性能比较与分析，根据六足椭圆并列式排布方式综合性能优秀、稳定性高、控制方案相对简明等优点确定了选择方案。确定机器人主题结构后附加设计了云台的结构并完善了器件排布等系统细节结构。

2. 机器人动作设计。介绍了机器人足部的运动学模型以及正运动学的 DH 坐标法解算，并确定了三角步态作为机器人步态规划的基本方法。本设计采用动作组方案作为控制策略，通过介绍前进的动作组分解说明了动作组的设计方法，并比较了实时控制与动作组控制，得出了在常规应用中，使用动作组控制方案并设置合理的关键动作即可满足大部分应用情况的结论。

3. 机器人通信系统设计。对通信系统采用的基础方法，即 socket 通信的原理进行了介绍，并说明了机器人图传程序的整体设计方案与其技术细节的实现方法。本设计使用 opencv 进行图像的编解码便于图像的数据传输。另外配置了服务器并设置了多线程与验证机制保证图传质量。在发送和接收端程序中设计了 UI 界面使得操作更加简单方便。

4. 机器人视觉系统设计。说明了针对不同目标所使用的不同目标检测方法。直线与圆这种简单目标则使用霍夫变换，颜色色块则使用 HSV 空间阈值法，检测诸如人脸等复杂目标则使用级联分类器。通过实际测试与原理分析对级联分类器与卷积神经网络的效果进行了对比，最终确定在本设计中选择级联分类器作为复杂目标的检测方法。

5. 机器人控制系统设计。首先介绍了控制系统的整体逻辑，随后介绍了本设计的硬件选择。出于本设计的功能与需求选择树莓派作为系统主控。选择了两种

型号的舵机作为关节执行器，由于其需要较大电流而树莓派无法提供，故选择舵机控制板作为辅助控制器并说明了上述硬件的性能指标与优点。出于对网络离线应用条件下的补充，设计了离线遥控器进行控制方案补充。本设计在目标追踪和执行运动指令时需要进行方向校正，而传统的 PID 算法对本设计采用动作组的运动方案的调节性能并不好，故终于选择使用了自己设计的闭环控制方案。

虽然本设计实现了目标的基础功能，但在功能性能上仍有较大的优化空间。

1. 采用动作组作为运动控制方案的基础虽然可以降低控制方案的复杂度与设计难度，但也限制了机器人的灵活度与对外界复杂环境的交互能力。可以参照现有的六足运动控制方案，设计可以实时进行目标姿态解算并执行动作的高效运控方案以针对更高精度需求的应用场景。采用这种方案也可以舍弃本设计自设计的相对粗糙的闭环控制方法从而使用更精确的姿态校准算法。

2. 虽然本设计采用了复数的验证方案试图保证图像的完整性，但出于树莓派性能限制、中转服务器带宽较小与时常的网络波动等原因，图像的传输有时还是会出现卡顿的现象且帧数偏低。在未来可以使用 Jetson Nano 作为主控，换用高带宽或者专线连接的服务器作为中转以提高图像的传输质量与帧数。

7.2 展望

在未来，六足机器人将被应用于更多领域与方面。对其结构进行微型化与集成化，可以满足狭小场景与需要隐蔽的应用情景。同时可以完成轮腿集成化，使得在平稳地貌使用轮作主要运动方式，恶劣地形使用足作主要运动方式，可以兼具稳定性与快速性。此外，六足机器人可以单独完成任务，还可以协同进行工作。通过局部信息的交换完成常规单个机器人难以完成的复杂任务。关于步态规划，目前的规划针对的环境并未覆盖常见应用场景且不够智能化。若实现实时识别环境条件进行步态生成和空间定位，则可以满足大部分非极端场景需求^[27]。

总的来说，六足机器人虽然在多方面取得了突破性进展，但是仍旧无法支撑其大规模应用^[28]。在未来的研究中，如果能够解决六足机器人实际应用所存在的部分乃至全部问题，六足机器人的优势将发挥的更加充分，六足机器人在未来将朝着更加集成、更加微型、更加智能的方向发展，得到更加广泛的应用。

参考文献

- [1] MCGhee R. Vehicular legged locomotion, in: Advances in Auto-mation and Robotics[M]. New York: JAI Press, 1985.
- [2] Rodney A. Brooks. A Robot that Walks; Emergent Behaviors from a Carefully Evolve-d Network[J]. Neural Computation, 1989, 1(2): 253-262.
- [3] KROTKOVE, Bares J,Kanade T, et al. Whittaker. Ambler: A six legged planetary rover[C]. Proceedings of the 5th International onference on Advanced Robotics, Pisa, 1991: 717-722.
- [4] 美国宇航局研制会“跳跃”的行星登陆机器人[EB/OL]. [2013-04-02]. <http://tech.qq.com/a/20130402/000014.htm>.
- [5] Uluc Saranli. RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(7): 616-631.
- [6] Moore E Z, Campbell D, Grimminger F, et al. Reliable stair climbing in the simple hexapod 'RHex'[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Tobotics and Automation. ICRA, 2002, 3: 2222-2227.
- [7] Altendorfer R, Koditschek D E, Holmes P. Stability analysis of a clock-driven rigid SLIP model for RHex[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004(23): 1001-1012.
- [8] Rovetta A, 王志英, 丁希仑. 六腿机器人的典型步态及其运动性能分析[C]//中国自动化学会智能自动化专业委员会, 江苏省自动化学会. 2009年中国智能自动化会议论文集(第二分册). 江苏电子音像出版社, 2009: 52-58.
- [9] 祝捷, 曹志奎, 马培荪. SMA驱动的微型双三足步行机器人作全方位运动的研究[J]. 传动技术, 2002(04): 11-15.
- [10] 徐小云, 颜国正, 丁国清. 微型六足仿生机器人及其三角步态的研究[J]. 光学精密工程, 2002(04): 392-396.
- [11] Pan Yang, Feng Gao. Leg kinematic analysis and proto-type experiments of walking- operating multifunctional hexapod robot[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(12): 2217-2232.
- [12] 陈锐东. 面向六足机器人的地形识别与运动规划研究[D]. 华南理工大学, 2019.
- [13] 李栓柱, 钟建锋, 程品, 罗欣. 六足机器人斜坡步态的设计[J]. 机械与电子, 2013(03): 53-57.

-
- [14]刘连蕊, 张泽, 高建华. 六足机器人横向行走步态研究[J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(02): 225-229.
 - [15]魏武, 戴伟力. 基于Adams的六足爬壁机器人的步态规划与仿真[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(01): 268-272.
 - [16]Zin Z M, Ibrahim R. Vision-based obstacle recognition system for automated lawn mower robot development[C]//Third International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2011). SPIE, 2011, 8009: 516-523.
 - [17]Choi B, Kim B, Kim E, et al. A new target recognition scheme using 24GHz microwave RADAR[C]//2012 International conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY2012). IEEE, 2012: 220-222.
 - [18]BUDIHARTO. A New Method of Obstacle Avoidance for Service Robots in Indoor Environments[J]. ITB Journal of Engineering Service, 2012, 44(2): 148-167.
 - [19]章熙民, 任泽霏, 梅飞鸣. 传热学[M]. 中国建筑工业出版社, 2007.
 - [20]郭建, 梁永杰, 张晓佳等. 基于步态规划的六足机器人运动学分析与计算[J]. 机床与液压, 2023, 51(05): 66-73.
 - [21]汪宇. 六足机器人行走步态规划及控制系统设计[D]. 湖北工业大学, 2021.
 - [22]王雅雪, 吴志鑫, 林瑞金, 周燕茹. 基于Raspberry Pi的六足行走机器人设计[J]. 福建轻纺, 2022(01): 32-38.
 - [23]罗亚非. 基于TCP的Socket多线程通信[J]. 电脑知识与技术, 2009, 5(03): 563-565+598.
 - [24]熊显名, 肖青山. 基于图像处理的隧道洞口自动识别应用[J]. 桂林电子科技大学学报, 2018, 38(04): 308-312.
 - [25]区苏. 基于OpenCV运动中可变特征目标的检测和跟踪[J]. 河南科技, 2014(09): 7-8.
 - [26]区苏. 浅谈级联分类器在目标检测中的应用[J]. 民营科技, 2018(08): 62.
 - [27]陈斯琴, 李思瑶, 鲁志刚, 国忠义, 解自国. 六足机器人关键技术综述[J]. 机电工程技术, 2022, 51(11): 146-152.
 - [28]刘庆运, 景甜甜. 六足步行机器人及其步态规划研究进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(07): 87-94.