

中国工程机器人大赛暨国际公开赛 (RoboWork)

工程创新项目工程创新设计赛

视觉机器人识别赛 02

技术报告

参赛学校: 西交利物浦大学

队伍名称: X-Power

参赛队员: 苑航 郑豪 张泰龙

带队教师: 陈敏 15995700090

张权 18262268572

填写日期: 2021 年 7 月

2021 中国工程机器人大赛暨国际公开赛诚信比赛承诺书

本参赛队（队伍编号 202103210211388）是 2021 中国工程机器人大赛暨国际公开赛参赛者。本人已认真阅读工程机器人大赛官网发布的相关比赛信息，阅读并理解中国工程机器人大赛暨国际公开赛 2021 年关于比赛的相关规定，并郑重做出如下承诺：

1. 本参赛队承诺签名为本参赛队指导教师和队员本人真实姓名，承诺书一经签署就意味着承诺人接受并承担本承诺书的全部责任和义务。
2. 本参赛队承诺参赛所用机器人、场地以及其他比赛相关工具/设备均真实、有效，符合赛项规则要求，符合其他参赛相关要求。提交的所有参赛材料真实、有效。
3. 本参赛队自觉服从中国工程机器人大赛暨国际公开赛的统一安排，接受组委会的监督和检查。
4. 本参赛队自觉遵守相关法律和比赛纪律、比赛规则，诚信比赛，不违规、不作弊。
5. 本参赛队承诺整个比赛过程严格按照赛事规则进行，按照要求提交材料，所提交参赛材料均真实有效且符合参赛要求。
6. 本参赛队承诺本队参赛机器人属于本参赛队所有，同一机器人没有重复参加比赛。
7. 本参赛队保证所用比赛场地规范、计时计分准确、视频拍摄真实。
8. 本参赛队承诺正式比赛视频在录制意外中断时则需进行重新录制，不会对正式比赛视频中的比赛过程内容进行剪辑。
9. 大赛技术委员会和裁判有权对参赛队伍参赛所使用的机器人、场地以及其他相关比赛用物品的真实性、有效性提出质疑，参赛队伍有责任和义务回复质疑。对有重大异议的作品，大赛技术委员会和裁判有权要求参赛队伍到现场进行重新比测。
10. 非不可抗因素，需要参加现场比赛的队伍要按照要求按时参加现场比赛。

若本参赛队违背上述各项承诺，自愿承受因此产生的后果。指导教师对所有真实性负全责，各高校盖章前要检查真实性。

承诺人签名：

指导教师 1 姓名(手签) 陈敏 身份证号 320683198108238024 联系方式 15995700090

指导教师 2 姓名(手签) 张权 身份证号 320203198312252532 联系方式 18262268572

队员 1 姓名(手签) 范航 身份证号 410303200109200515

队员 2 姓名(手签) 郑豪 身份证号 610302199912215113

队员 3 姓名(手签) 张春龙 身份证号 421302200003113153

所在单位公章

2021 年 7 月 2 日



关于技术报告使用授权的说明

本人完全了解 2021 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: 苑航

郑豪

张泰龙

带队教师签名: 陈敏

张权

日期: 2021.7.2

目 录

摘要	6
1 综述	6
1.1 前言	6
1.2 研究现状	7
1.2.1 国内研究历史及现状	7
1.2.2 国外研究历史及现状	7
1.3 发展趋势	9
2 系统整体设计	9
2.1 系统概述	9
2.2 机械结构设计	10
2.3 硬件设计	10
2.4 软件设计	10
3 机械机构设计	10
3.1 机械系统设计理念	10
3.2 各部分机械机构分析	11
3.3 作品整体效果图	12
4 硬件设计	13
4.1 LX-16HV 高压总线舵机	13
4.1.1 技术参数	13
4.1.2 舵机外形图纸	13
4.1.3 选型	13
4.1.4 硬件电路设计	14
4.1.5 功能	14
4.2 树莓派 4B 及扩展板	14
4.2.1 技术参数	14
4.2.2 外观	15
4.2.3 选型	15
4.2.4 硬件电路设计	15
4.2.5 功能	15
4.3 锂电池	15
4.3.1 技术参数	15
4.3.2 选型	15
4.3.3 硬件电路设计	16
4.3.4 功能	16
4.4 USB 摄像头	16
4.4.1 技术参数	16
4.4.2 选型	16

4.4.3 功能	16
5 软件设计	16
5.1 控制策略分析及主要功能	16
5.1.1 自主巡线功能	16
5.1.2 彩柱识别功能	17
5.1.3 桥梁穿越功能	17
5.1.4 矮门穿越功能	17
5.1.5 自主射门功能	17
5.2 算法分析	17
5.3 主程序框架流程图	18
6 系统开发与调试	18
6.1 调试及测试	18
6.1.1 自主寻线功能调试及测试	18
6.1.2 彩柱识别功能调试及测试	18
6.1.3 桥梁穿越功能调试及测试	18
6.1.4 矮门穿越功能调试及测试	19
6.1.5 自主射门功能调试及测试	19
6.2 注意事项	19
7 结论	20
参考文献	21
附录	22

智能识别双足机器人的稳定控制与算法优化

苑航, 郑豪, 张泰龙

(西交利物浦大学 智能工程学院, 苏州 215123)

摘要: 双足机器人得益于现代人工智能技术的支持, 广泛地在实践中应用和推广, 进入社会生活的方方面面, 逐渐成为研究重点。本文基于视觉机器人比赛项目的设计, 调试与优化, 针对双足机器人的机械结构与软件系统的设计, 以实现仿人姿态完成智能识别等比赛项目。使用机器人视觉算法及循迹算法实现机器人自主巡线, 色彩识别, 自主射门等功能。根据视觉反馈, 优化机器人的步态控制, 调试使其运动动作更加协调。依据实际比赛环境下外界因素对机器人实际表现的影响, 优化各个功能的算法。经测试验证, 机器人对外界环境的抗干扰能力提升, 拥有更稳定的表现, 实现了对于高自由度机器人的稳定控制。

关键词: 双足机器人; 智能识别; 步态控制; 优化

Stability control and algorithm optimization for intelligent recognition of bipedal robots

YUAN Hang, ZHENG Hao, ZHANG Tailong

(School of advanced technology Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China)

Abstract: Bipedal robots benefit from the support of modern artificial intelligence technology and are widely used and promoted in practice, entering all aspects of social life and gradually becoming a focus of research. Based on the design, debugging and optimization of vision robot competition projects, this paper addresses the design of mechanical structures and software systems of bipedal robots to achieve humanoid postures to complete competition projects such as intelligent identification. The robot vision algorithm and tracing algorithm are used to realize the functions of autonomous patrol, color recognition and autonomous shooting. Based on the visual feedback, the gait control of the robot is optimized and debugged to make its movement more coordinated. Optimize the algorithms for each function based on the impact of external factors on the actual performance of the robot in the actual competition environment. After testing and verification, the robot's anti-interference ability to the external environment is improved, and it has a more stable performance and achieves stable control for the high degree of freedom robot.

Key words: Biped robot; Intelligent recognition; Gait control; majorization

1 综述

1.1 前言

随着科学技术的发展, 机器人成为近些年发展起来的一门综合学科, 其门类不断丰富, 含义也在不断扩展。机器人已经不再局限于生产车间的工作环境, 而走向更广阔的人类生活环境。

双足机器人典型特点是机器人的以刚性构件通过转动副联接,模仿人类关节结构,并通过执行机构完成各关节之间一定角度的相对转动。双足机器人在多传感器信息融合技术、智能控制、导航与定位等技术帮助下 [1],与其他足式机器人相比有行走环境适应性强、活动范围与工作空间广阔、步行性能优越的优点 [2]。

视觉作为机器人最重要的感官之一,已经广泛地应用于机器人控制研究领域,如视觉跟踪、视觉伺服等。利用视觉测量来控制机器人或保持摄像头的位置、取向,帮助机器人矫正上升下降不稳定的步态 [3]。在视觉的辅助下双足机器人利用基于动态轮廓的方法从周围环境的图像中提取可能利用的直线特征,实现快速检测。对识别出来的方向角和位置及进行连续监测,以达到智能识别的效果。当行走轨迹上出现的偏差超过一定的阈值,则通过倾斜身体和调整行走轨迹来保持双足机器人的稳定行走 [4]。

此外,智能识别双足机器人除了能够完成人类基本动作姿态,还能够代替人类在粉尘、辐射、有毒等极限环境下作业,具有广阔的应用前景。

而智能识别双足机器人需要解决的难点在于:

(1) 实现精确的步态规划,以保持机器人的稳定性和各机构的协调,以至于在行走的过程中不会发生倾覆和跌倒 [5]。

(2) 增强机器人姿态鲁棒性 [6]。

(3) 完成视觉系统对目标的快速识别和实时识别,并进行跟踪。

1.2 研究现状

1.2.1 国内研究历史及现状

国内双足机器人研究起步较晚,开始于20世纪70年代,经历“八五”“九五”的攻关。1988年国防科技大学的六关节平面运动型双足步行器——“先行者”是国内第一台仿人机器人。高1400mm,重20kg,可以以每秒两步的频率动态步行,能够在小偏差的不确定环境中行走。随后哈尔滨工业大学、北京理工大学、中科院沈阳自动化所等单位也开展相关研究,并取得了很多成果。如哈尔滨工业大学的HIT系列、北京理工大学的BHR系列双足机器人(如图1) [2]。

除了以上所述动力驱动机器人,Mogeer在1989年提出“被动动力步行”的概念——利用多个内置传感器调节机器人行走的姿态,以低能耗实现仿人步行的效果。

国内对此开展的研究并不多,北京大学在2006年10月研制的双足机器人“Runbo-1”,使用每条机械腿单个电机驱动,利用弹性机构仿人被动关节,很大程度上模仿了人类的运动 [2]。

针对双足机器人步态规划与稳定控制的问题,2011年中国科学技术大学宋宪玺等人提出利用几何约束法,用摆线拟合踝关节运动轨迹,设计模糊控制器,对踝关节的滚转角度进行调整,使ZMP位置靠近支撑区域中心,保证了机器人的稳定行走。并建立了虚拟样机进行仿真,验证了上楼梯步态与模糊控制器的有效性,为系统设计提供了保证 [7]。

我国在机器人的研究过程中多数主要根据国外的研究成果进行二次开发,这种情况的增多导致我国在创新领域的落后,不利于双足机器人智能化的进一步发展。

1.2.2 国外研究历史及现状

国外双足机器人研究起步较早,开始于20世纪60年代,在1968年美国通用公司研制

的名为“Rig”的操纵型双足步行机器人，揭开了双足机器人研究的序幕。但当时该机器人关节数较少，操作者通过力反馈感觉来维持机器人平衡。

1968~1969年，南斯拉夫的著名科学家 M. Vukobratovic 提出了一种重要的研究双足机器人的理论，即 MP 稳定判据，并研制出世界上第一台真正意义的双足机器人。随后各国的研究机构也都开展双足机器人的研究，其中日本的研究成果最为突出 [2]。如早稻田大学加藤一郎教授所领导的课题组相继研制的 WL 系列、WABIAN 系列双足机器（如图 2）；本田公司自 1986 年起推出的 1、2、3 型机器人主要用于家用领域，可以自由上下楼梯。

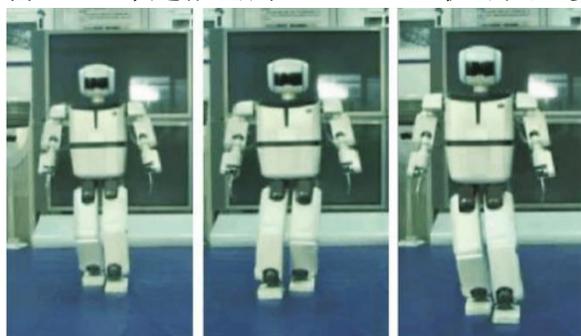


图 1 BHR-3 行走实验

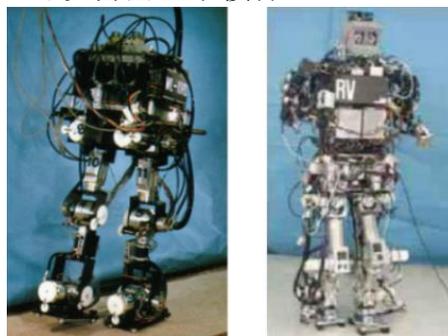


图 2 WL 系列与 WABIAN 系列机器人

2000 年，本田公司推出双足步行机器人“AMISO”（如图 3），是日前比较先进的双足机器人。AMISO 身高 1300mm，体重 54kg，具有 34 个关节自由度。采用可以实时预测动作，调整重心改变步调的 I-WALK 技术，增加了步行、转弯动作的流畅性，提高了奔跑速度达到 6km/h。并且实现了利用手推车、搬运物品的功能，所有功能受到综合控制系统的同一控制。AMISO 的性能参数如下表所示。



图 3 AMISO 的基本动作和高级功能

表 1 AMISO 的性能参数

参数名称	基本参数
正常行走速度	时速 2.7km
搬运行走速度	时速 1.6km（搬运重量 1kg）
正常奔跑速度	时速 6km
转弯奔跑速度	时速 5km（转弯半径 2.5m）
跳跃时间	跳跃时间 0.08s、跳跃时两脚离地前进距离为 50mm
身高	1300mm
体重	54kg
关节自由度	34 个

2003 年，德国慕尼黑工业大学成功研制了仿人机器人 Johnnie。该机器人身高 1.8m，体重 40kg，具有 30 个自由度，正常行走速度为 2.2km/h。该单位对机器人开展了复杂环境下的视觉导航和基于视觉的行走策略研究。智能识别与双足机器人的联系愈发密切。

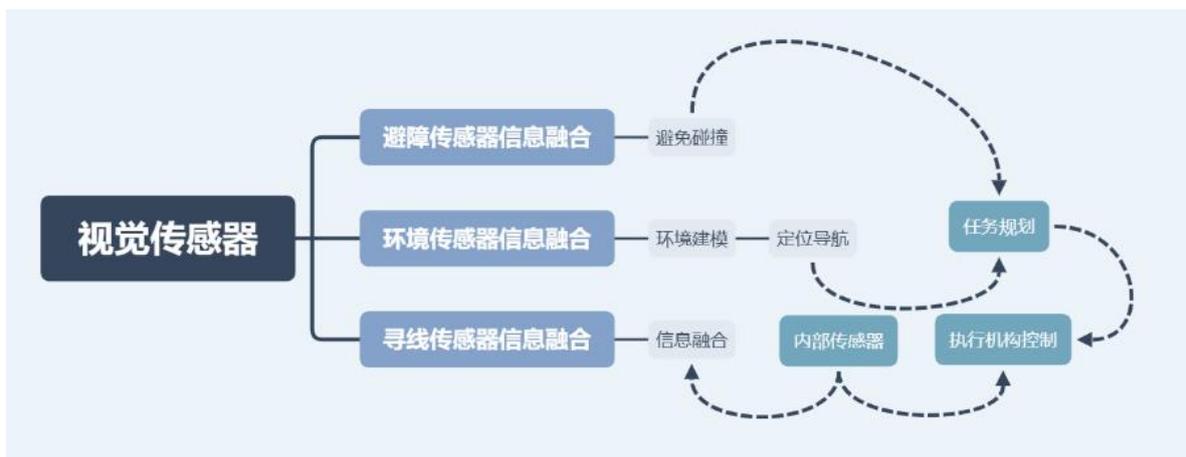


图 4 视觉识别系统工作流程

2002 年，索尼公司研发出 QRIO 机器人，身高 50cm，重约 7kg，具有 38 个自由度。该机器人是世界上首台不同于竞走运动，行走时双足可以离开地面的机器人。

2010 年，韩国庆熙大学 Soo Kim 等人研究了一种具有 12 个自由度，行走过程中具有视觉反馈的双足步行机器人。该机器人配备了廉价的 FSR（薄膜压力传感器），这些传感器安装在机器人的脚底，可以瞬间获得 ZMP（零力矩点），并且在头部安装了一个廉价的 USB 摄像头，用来在行走过程中处理图像 [4]。

1.3 发展趋势

虽然双足机器人目前在国内外都取得了不少的研究成果，但是在鲁棒性、智能识别、人机协调合作方面还有所欠缺。综合研究现状，双足机器人具有如下发展趋势：

（1）稳定性和控制策略。通过研究发现，机器人的稳步控制中，最核心的优化设计是机器人重心的建立，通过减少电机数量，合理优化设计让机器人在运行时，舵机一直处于重心的稳定域内，实现稳步的操控 [8]。在此方面，ZMP 方法被广泛应用，并已证明为双足机器人提供鲁棒和有效的运动 [9] [10]。

（2）传感器的利用提升。双足机器人的视觉输入在很大程度上受自身步行动力学的影响。机器人的视觉传感器得到提升就能够通过主动、有效的摄像机控制来应对动态和完成任务，实现主动视觉。主动视觉是选择和分析视觉场景的各个部分的顺序的交互过程。只选择和与行为相关的视觉特征，以对抗图像扰动，达到提高智能识别的效果 [11]。

（3）完善人机协调系统。机器人与人不是替代与被替代的关系，将机器人的灵活、机动性发挥出来，尽可能多地扩展到人类限制工作的范围，所以良好的人机协调系统很重要。

2 系统整体设计

2.1 系统概述

本作品为智能视觉人形机器人，其以硬铝合金作为机体材质，且进行了表面硬化处理并设计了加强结构，使其在重量允许的范围内保证了机器的强度。机器人基于树莓派 4B 平台开发。树莓派 4B 拥有较强的性能，便于编程，且可以用 WIFI 对其进行无线操控。机器人拥有

20 个自由度，每个自由度都由 LX-16HV 高压总线舵机进行驱动。其头部拥有 2 个自由度且搭载 120° 广角摄像头，使其拥有广阔的视野来进行视觉识别。内置的 11. V3000mAh 的大容量锂电池，使其拥有进 2 个小时的续航。在软件层面，机器人通过 OpenCV 进行图像识别，PID 算法实现物体位置的捕捉，完成视觉的识别。且调试软件拥有简洁易懂的图形界面。可以方便的进行视觉和动作的调整。

2.2 机械结构设计

机器人的材料采用硬铝合金，在能承受一定载荷的同时其较低的重量能有效降低舵机的负载。机器人拥有 20 个自由度：头部 2 个自由度；每个肩关节 2 个自由度；每个肘关节 1 个自由度；每个髋关节 3 个自由度；每个膝关节 1 个自由度；每个踝关节 2 个自由度。

2.3 硬件设计

机器人采用高压总线舵机，在既保证强大动力的同时，又能够通过舵机 ID 精确的控制每一个舵机，最终实现高效且精准的控制机器人的每个关节的目标。控制系统采用树莓派 4B，其拥有出色的算力，丰富的接口，小巧的体积等特点，适合智能机器人的开发。并且其内置的 WIFI 模块让机器人得以实现无线控制，便于调试。电源采用 11. 1V 3000mAh 锂电池，正好满足高压舵机的电压需求，能为机器人提供不错的续航。即插即用的免驱动 USB 摄像头拥有 120° 的宽广视野，便于比赛中各个目标物的识别。

2.4 软件设计

机器人的软件程序主要包含两个部分，分别是动作组的载入和目标物的识别。动作组的载入，既可以根据所识别的导航线，黑色横线等标识来判断下一个动作组，在没有表示标识时，也可以通过倒计时来触发动作组的载入。而目标物的识别主要包括巡线算法和视觉算法。巡线算法使用的是矩阵算法，将摄像头传感器获得的像素点进行处理，建立参数矩阵，通过运算最终得出图像平面坐标。视觉算法

将利用 RGB 颜色传感器对像素进行识别，通过检测三基色在物体表面反射光的强度识别颜色。利用以上的程序即可完成比赛要求。

3 机械机构设计

3.1 机械系统设计理念

由于舵机的扭矩范围是一定的，其所能承受的负载有限，因此，为了减轻舵机的负载，需降低机器人的重量。即要求制作机器人的材料：能够承受一定的载荷、本身质量较轻并且制作成本合理。经过考虑，选择硬铝合金作为机器人的原材料。并对材料表面进行硬化处理，结合加强结构设计，以提升机器人自身的鲁棒性。

根据人体分析结果，人体在一次行走周期中有两次位移为 5cm 的垂直运动和一次横向运动。因为髋关节的调节或诱导的身体运动是倾斜的。这种运动通过人体行走时质心的相应调整来补偿动态不稳定性 [12]。

本研究使用的 AiNex Pro 智能视觉双足人形机器人的结构以人体为原型，采用双足对称式分布结构。该机器人重量为 2. 15kg，直立姿态下身高 413mm，身宽 188mm，前后厚度 144mm，具有 20 个自由度：头部 2 个自由度；每个肩关节 2 个自由度；每个肘关节 1 个自由度；每个髋关节 3 个自由度；每个膝关节 1 个自由度；每个踝关节 2 个自由度。因此，带有两条腿的

下体有 12 个自由度，上体有 8 个自由度。

机器人行走的控制系统是一块树莓派 4B 主板和树莓派扩展板，利用 PC 端可视化上位机软件对全身 20 个 LX-16HV 高压总线舵机进行调节。

机器人采用 11V 3000mAh 的大容量锂电池对全身进行供电。

将分辨率 640*480 的 USB 摄像头安装在机器人头部，用于视觉反馈，提高行走稳定性。

表 2 为机器人规格说明。

表 2 AiNex Pro 机器人规格

参数名称	基本参数	
机体重量	2.15kg	
机体尺寸	高 413mm*宽 188mm*厚 144mm	
自由度	头部	2 个自由度
	肩关节	2 个自由度*2
	肘关节	1 个自由度*2
	髌关节	3 个自由度*2
	膝关节	1 个自由度*2
	踝关节	2 个自由度*2
舵机	20 个 LX-16HV 高压总线舵机	
控制系统	树莓派 4B 主板、树莓派拓展板	
软件	PC 端可视化上位机软件	
摄像头	可视角度：120° 产品像素：30 万像素 (640*480)	
电源	连接方式：USB 免驱 输出格式：Mjpeg 输出 11V 3000mAh 的大容量锂电池	

3.2 各部分机械结构分析

自上至下对机器人各部分机械结构进行分析：

头部(如图 5)宽约 46.5mm，高约 61mm，厚度约 64mm 具有 2 个自由度，可以实现 pitch 轴的俯仰运动和 yaw 轴的偏航运动。

肩关节(如图 6)宽度约 35mm，厚度约 41mm，具有 2 个自由度，可以实现机器人臂部的前后和上下摆动。

肘关节(如图 7)具有 1 个自由度，可以实现机器人手部的前后摆动。



图 5 头部结构图



图 6 肩关节结构图



图 7 肘关节结构图

髌关节(如图 8)宽约 81.5mm，厚约 47mm，具有 3 个自由度，可以实现机器人大腿的上下抬起和左右摆动动作(此处需要设置两个互相垂直的舵机)，以及腰部的扭转动作。

膝关节(如图 9)具有 1 个自由度，可以实现机器人的屈膝动作。

踝关节(如图 10)具有 2 个自由度，可以实现机器人脚板的上下和左右摆动动作(此处需设置两个相互垂直的舵机)。



图 8 髋关节结构图



图 9 膝关节结构图



图 10 踝关节结构图

该双足机器人下体的结构尺寸如下：高为 249mm，脚板长为 135mm，脚板宽为 76mm，脚板厚为 1.5mm，大腿长为 54mm，小腿长为 44mm，从髋关节到膝关节的距离为 119mm，从膝关节到踝关节的距离为 77mm。

在机器人双腿的外端，即图 11 所示的舵机输出端，舵机的外壳通过舵机法兰与内侧腿板联接在一起，舵机法兰内的齿轮啮合在舵机输出轴的齿轮上。舵机输出轴通过舵机法兰与外侧腿板固定在一起。当舵机转动时，两个腿板即内、外侧腿板之间会产生相对转动。

由于舵机的尾端没有输出轴，因此尾端与内侧腿板间不需要联接。舵机法兰与内侧腿板为过盈配合，舵机法兰与外侧腿板之间装有一个塑料垫圈，防止外侧腿板在转动时与舵机法兰产生摩擦。而内、外侧腿板间通过舵机法兰用螺丝固定联接在一起，舵机法兰套在舵机尾部延伸出的与输出轴同轴心的部分上，如图 12 所示。因此，在舵机尾部处的内、外侧腿板间也能够相对转动。

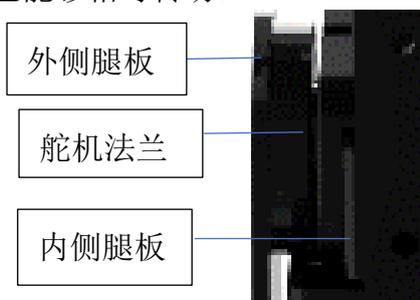


图 11 LX-16HV 高压总线舵机输出端结构简图

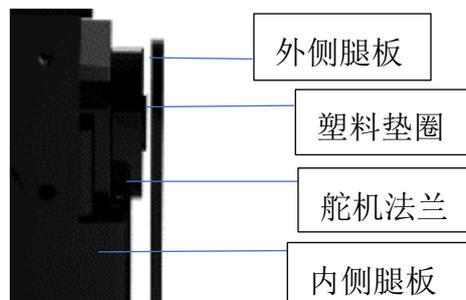


图 12 LX-16HV 高压总线舵机尾端结构简图

3.3 作品整体效果图



图 13 机器人正视效果图

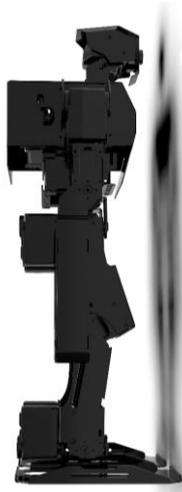


图 14 机器人俯视效果图

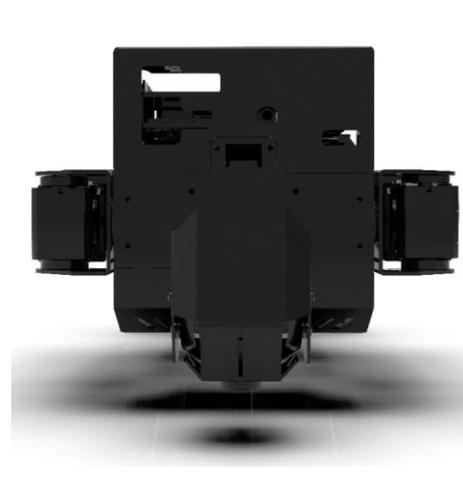


图 15 机器人侧视效果图

4 硬件设计

机器人的硬件主要包括 LX-16HV 高压总线舵机、树莓派 4B、锂电池、广角摄像头。本部分将详细分析这 4 种器件，以此来阐明机器人的硬件设计。

4.1 LX-16HV 高压总线舵机

4.1.1 技术参数

表 3 LX-16HV 舵机技术参数

参数名称	基本参数	参数名称	基本参数
产品名称	三端口智能总线高压舵机	产品重量	57g
产品尺寸	40mm×20.14mm×51.1mm	工作电压	9-12.6V
转动速度	0.20sec/60° 11.1V	堵转扭矩	17kg·cm 11.1V
转动范围	0° ~240°	空载电流	100mA
堵转电流	1.7~2A	舵机精度	0.3°
控制角度范围	0~1000, 对应 0~240°	控制方式	UART 串口指令
通讯波特率	115200	存储	掉电保存用户设置
舵机 ID	0~253 可设置, 默认为 1	回读功能	支持角度回读
保护	堵转保护/过温保护	参数反馈	温度、电压、位置
工作模式	舵机模式和减速电机模式	齿轮类型	金属齿
接插件类型	PH2.0-3P	适用于	各类仿生机器人关节

4.1.2 舵机外形图纸

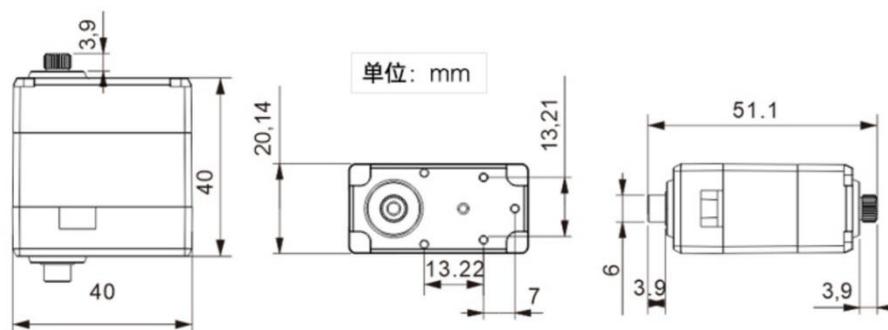


图 16 舵机外形图纸

4.1.3 选型

从机器人的结构上来看，机器人需要有 20 个自由度。因此采用总线舵机更加合适。总线舵机采用串口的形式发送指令，可以将舵机串联起来进行控制。舵机的顶部、左侧、右侧均有接口，方便了接线，使系统整体显得简洁。此外 LX-16HV 舵机支持用户可自定义的舵机 ID。对于拥有 20 个自由度的机器人来说，通过舵机 ID 来识别舵机并行性控制，可以实现更精确和有条理的控制机器人的动作。从性能角度来看，LX-16HV 是一款高压舵机。在拥有大扭矩的同时，相较于传统舵机能减少 60%以上的电流，能大大延长机器人的续航时间。LX-16HV 同是也是数字舵机。得益于其中的微处理器，数字舵机能发射更高频率的动力脉冲，使舵机的反应更快且拥有更好的精度。从控制角度来看，LX-16HV 舵机支持幻尔公司提供的舵机调试软件。调试软件拥有图形界面，配合其堵转保护、过温保护、舵机 ID 设定等人性化功能，使舵机的调试变得更加简单方便。从耐久性来看，舵机的受力大的齿轮均采用金属材料制成，大

大增强了齿轮的耐磨度和寿命。此外还可以选配金属舵盘，使舵机的动力在输出时能更加稳定。通过分析结构、性能、控制、耐用性这4个方面。LX-16HV 三端口智能总线高压舵机成为了机器人所使用的舵机。

4.1.4 硬件电路设计

总线舵机的驱动电路(如图17)，使用了74HC126D这颗芯片。当需要写入数据时，将TX CON调成高电位，串口TX发送与输出相同。而当RX CON为高电位，串口RX将始终处于高阻抗关断状态，处于不工作状态。下面有6个连接器用来连接舵机，其中三个插针对应舵机的三条线，分别为信号线、正极、负极。

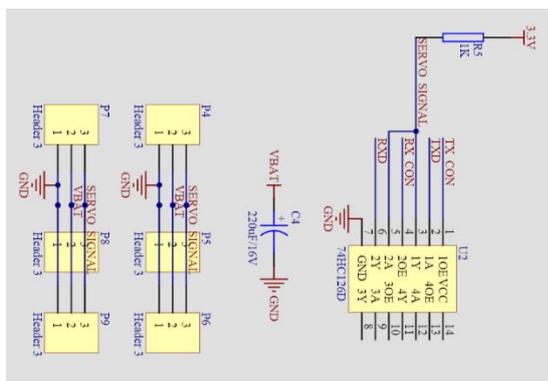


图17 总线舵机驱动电路

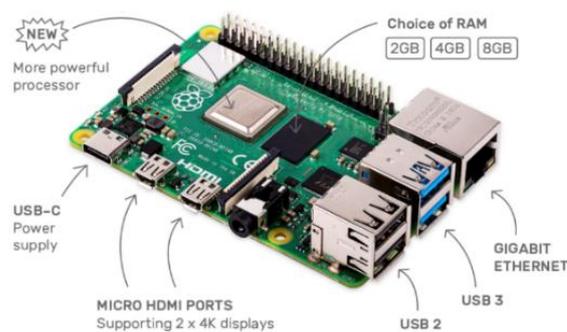


图18 树莓派4B外观

4.1.5 功能

机器人中舵机的功能是作为机器人的关节，为机器人提供动力。通过舵机的转动，模拟人类关节的转动，从而为机器人提供动力，实现各种所要求的动作。

4.2 树莓派4B及扩展板

4.2.1 技术参数

表4 树莓派4B技术参数

参数名称	基本参数	参数名称	基本参数
型号	树莓派4B	SOC	BroadcomBCM2711
CPU	Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit @ 1.5GHz	GPU	VideoCore VI, H.265 (4Kp60 decode), H.264 (1080p60 decode, 1080p30 encode), OpenGL ES 3.0 graphics 500Mhz
内存	1GB/2GB/4GB/8GB (Rev1.2) LPDDR4	USB 接口 个数	2 × USB 3.0 ports 2 × USB 2.0 ports
视频输入	2-lane MIPI CSI camera port	影像输出	2 × micro-HDMI ports (up to 4Kp60 supported) 2-lane MIPI DSI display port composite video port
音源输出	HDMI/stereo audio	板载存储	Micro SD card slot
网络接口	Gigabit Ethernet 2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11ac wireless Bluetooth 5.0 BLE	外设	Raspberry Pi standard 40 pin GPIO header (fully backwards compatible with previous boards), 6 × I2C, 6 × UART (muxed with I2C), 5 × SPI

4.2.2 外观

详见图 18 所示

4.2.3 选型

机器人选用了树莓派 4B 作为控制核心。树莓派作为微型电脑，能够利用其做很多事情。从性能表现上来看，树莓派 4B 使用 Cortex-A72 (ARM v8) 架构处理器，并且可以选配 2G、4G、8G 大内存，相比与前代产品有了成倍的性能提升。可以完全胜任机器人的信息处理和控制的的工作。从接口来看，树莓派 4B 拥有 40 个 GPIO (通用输入/输出) 引脚。可以按照需求连接到所需的传感器等外部器件，并通过 Python 等编程语言与它们交互。对于本机器人来说，通过树莓派扩展板，就可以将总线舵机和电源连接到树莓派 4B 上并对其进行交互。此外树莓派 4B 所支持的 USB 接口也为 USB 摄像头的使用提供了方便。从控制角度来说，树莓派 4B 内置了 WIFI 和蓝牙。本机器人就采用了 WIFI 的控制方法。可以通过 WIFI 来远距离操控机器人。对机器人的开发与调试提供了十足的便利。通过对性能、接口和控制三个方面的考虑，最终选择了树莓派 4B 及其扩展板作为机器人的控制核心。

4.2.4 硬件电路设计

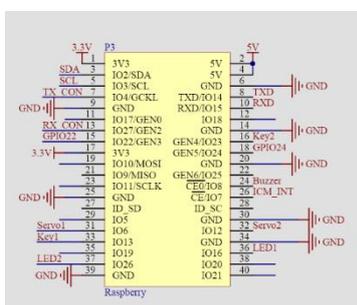


图 19 树莓派 4B 硬件电路

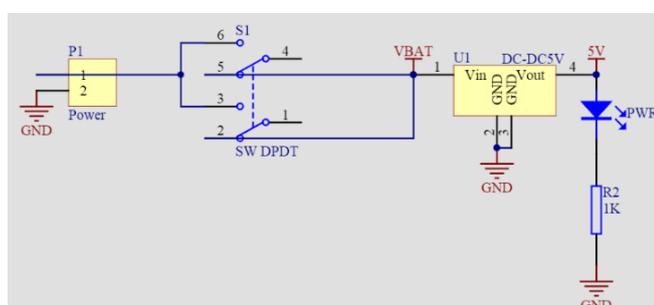


图 20 稳压电路

4.2.5 功能

树莓派 4B 及其扩展板作为控制系统，相当于人类的“大脑”。其功能在程序的指示下，接收传感器如摄像头和舵机的信息，处理信息，并发出指令来控制执行器执行相应的操作。

4.3 锂电池

4.3.1 技术参数

表 5 锂电池技术参数

参数名称	基本参数	参数名称	基本参数
电池型号	11.1V 3000mAh 锂电池	电池电压	11.1V
电池容量	3000mAh	放电倍率	5C
电池尺寸	72*55*19mm	电池重量	159g

4.3.2 选型

这款 11.1V 3000mAh 的锂电池，拥有 11.1V 的高电压，能正好适配 LX-16HV 高压舵机所需要的电压，为舵机提供强劲的动力。其适当的大小、重量以及尚可容量也是选择这款电池的原因。

4.3.3 硬件电路设计

该锂电池内部是一个稳压电路（如图 20），通过一个稳压模组（DC-DC5V）将锂电池电源的电压减小到 5V，使其可以为其他器件如树莓派 4B、蜂鸣器等器件供电。

4.3.4 功能

为机器人所有需要用电的器件包括：摄像头、舵机、树莓派 4B 及其扩展版等供电。

4.4 USB 摄像头

4.4.1 技术参数

表 6 USB 摄像头技术参数

参数名称	基本参数	参数名称	基本参数
型号	hv3808	产品类别	USB 摄像头
传感器类型	CMOS	传感器像素	30 万
最高分辨率	640*480	帧率	30fps@YUV
响应率	3.3V/LUX-SEC	动态范围	3.3V/LUX-SEC
信噪比	39dB	最低照度	0.1LUX（彩色）
板子直径	28mm	接口	USB2.0
对焦	支持手动对焦	图片格式	MJPEG, YUV
是否需要驱动	免驱	协议支持	支持 UAC1.0 和 UVC1.1/1.5
附加功能	内置麦克风		

4.4.2 选型

该彩色摄像头符合机器人自主巡线和识别颜色的需求。摄像头可视角度 120°，拥有良好的视野，便于追踪所需要识别的物体。其次这款摄像头可以通过 USB 与树莓派 4B 主板相连而且不需要驱动，即插即用十分方便。综上所述，机器人将会搭载这款摄像头。

4.4.3 功能

摄像头对机器人来说非常重要，其相当于机器人的“眼睛”。摄像头的主要功能是在舵机的控制下清晰的捕捉黑线、红色彩柱、绿门等目标，将画面快速而准确的传递到控制中心为接下来的图像处理做准备。

5 软件设计

在进行软件设计之前，首先需依照比赛要求整理需求文档。经阅读比赛规则等相关要求，该软件系统需包含五个主要的功能模块，即自主巡线模块，彩柱识别模块，桥梁穿越模块，矮门穿越模块以及自主射门模块。依照规则要求，可以将各个功能模块设计为依次进行，实现完成整个比赛任务的目的。根据需求文档可以绘出系统流程图，更加清晰地展示各项功能模块与整体系统间的联系。在此基础上，可以得出各个功能模块的控制策略。

5.1 控制策略分析及主要功能

5.1.1 自主巡线功能

对于最基础的自主巡线功能，需要机器人识别地面上的黑线并沿着黑线前进。从流程图可以看出，这个功能与其他各个功能间都有联系。在其他各项功能结束时需要重新调用巡线功能。首先载入机器人前进动作的动作组，使其能向正面面对的方向向前直行。若机器人视

野内丢失黑色导航线，则载入调整动作组，向相反方向小步移动至黑线出现在视野中央。当识别到向左偏向或向右偏向以及需要过弯时，则载入向左移动或向右移动动作组，使机器人与黑色导航线保持平行。巡线功能的算法使用基本的矩阵算法，若要进一步优化机器人巡线算法，可以采用 PID 控制算法，将其数字化后引入机器人巡线算法来优化巡线的性能 [13]。

5.1.2 彩柱识别功能

对于彩柱识别功能，需要使用视觉算法来识别红色彩柱。当机器人第一次识别到黑色横线时，载入彩柱识别动作组，使机器人头部摄像头转向彩柱位置并识别色彩。一般的视觉算法中会使用 RGB 色彩传感器进行像素收集，通过检测三基色在物体表面反射光的强度识别颜色。然而这一传感器会受外部光线等因素的影响，这一问题也在后面的测试环节展现了出来。因此，在后面的升级过程中，可以尝试使用一种基于线阵 CCD 的真彩色循迹传感器。其根据收集到的反射光中三色的比例进行检测来识别颜色 [14]。

5.1.3 桥梁穿越功能

对于桥梁穿越功能，需要机器人识别到桥梁并调整动作姿态来通过桥梁。其中包括了视觉识别以及动作组的调整。首先，当机器人在巡线时检测到黄色横线，则载入调整动作组，使机器人调整姿态，正对桥梁，以免因为偏向而在上桥动作执行时造成倾倒。接着载入上桥动作，使机器人通过较大跨步走上桥梁。在桥梁上继续巡线功能直至再次识别到黄色横线，再次载入调整动作组使机器人调整姿态，然后载入下桥动作组，使机器人走下桥梁。在每个连续动作前设置延迟，以避免机器人因惯性导致后面动作的失误或发生倾倒。

5.1.4 矮门穿越功能

对于矮门穿越功能，需要机器人识别到绿色矮门并低身前进通过。该功能的控制策略与上一功能桥梁穿越功能有所联系。由于没有触发机器人进行矮门识别的标志，可以使用计时器来触发。当机器人完成桥梁穿越功能后，启动计时器，当计时器到达设置数值时，则载入矮门识别功能，若未识别到矮门则继续进行巡线并重复识别动作。当识别成功时，载入低身前进动作组，设置计时器，使机器人保持低身前进姿态直至通过矮门。

5.1.5 自主射门功能

对于自主射门功能，需要机器人分别识别目标小球和射门区域并调整姿态将球射入门中。首先，当机器人第二次识别到黑色横线时，载入射门准备动作组，使机器人从黑色起点线向前移动到合适的射门位置。接着进行识别，分别识别目标小球和射门区域，并依照相对位置建立坐标轴，然后使机器人进行微小的移动，当目标小球和射门区域的中心点处于同一直线上时，载入射门动作组，使机器人完成射门动作。

5.2 算法分析

在此次软件设计中，较为重要的两个算法为巡线算法和视觉算法。机器人首先通过相机传感器获取像素点，然后建立起内部的参数矩阵，通过内部参数矩阵和特征点坐标建立起相应的图像平面坐标 [15]。当视觉处理完成后，利用反射光值的不同判断机器人的位置并做出调整。而由于比赛场地中有许多干扰因素，如外部灯光等，会对机器人的识别和判断造成影响。因此这两种算法在以后的系统升级过程中还可以进行优化。

5.3 主程序框架流程图

详见附录中图 21

6 系统开发与调试

在组装及编码阶段完成后，依据比赛规则对机器人的各个功能部分进行调试，以实现用最快速度完整的跑完比赛场图的目的。

在调试过程中，按照功能将其分为五个阶段，包括自主巡线调试，彩柱识别调试，桥梁穿越调试，矮门穿越调试和自主射门调试。其中包括对机器人的色彩识别，动作组和动作延迟的调整。在调试阶段完成后，需要对各个部分功能进行独立测试。当各个部分功能成功实现后，再进行最终的系统整体测试。

6.1 调试及测试

6.1.1 自主巡线功能调试及测试

在自主巡线功能的调试中。除基础步态算法外，机器人行进间的动作也是影响其行动快慢的因素之一。

在巡线功能调试初期，机器人步幅较小，步频较慢，行进速度缓慢。且行进时身体摇摆幅度大，非常容易发生倾倒。于是对机器人行进间动作组进行调整，使其更加模拟人类直立行走姿态。经过调整发现，因机器人脚掌宽大，在行进时若双腿较为合拢，双足掌间极易发生摩擦，进而阻碍前行或引起跌倒。进而，调整双腿间距使双足掌间留有约 5 到 10 毫米的间距。经测试，机器人的步频和步幅得到了优化，前进速度更快，失误率也有所降低。

经过研究发现，由于机器人上体包含了电池和集成电路板等原件，重心偏向于上体，在完全直立的姿态下非常容易发生后仰。因此，调整机器人的膝关节达到双腿微曲、降低重心，使机器人行走更稳定的目的。经过调试，自主巡线功能基本实现，机器人行进间动作也更为协调。

调试后测试，机器人可以快速踏步前进，并能保持重心，在前进和过弯时不倾倒。

6.1.2 彩柱识别功能调试及测试

按照比赛场图顺序，第一项任务为彩柱识别，即在交叉黑线处识别红色圆柱。需要调试的部分主要为视觉部分。在调试前，机器人主要出错的问题在于无法识别彩柱，提前识别彩柱（将终点射门区域的红色误识别）。

首先进行视觉对色彩识别的调试，将红色的对比度及饱和度调整至合理范围。经调试，机器人对红色彩柱的识别已经保持在了一个较高的成功率。其次，对于提前识别行为，经过多次调试，发现依旧是色彩识别的问题。由于灯光，机器人有概率会将并齐的两只脚掌识别为交叉的黑线，进而触发对彩柱的提前识别，而由于并不能识别到彩柱，系统会处于暂停状态，影响后面的比赛任务。经过多次尝试，通过将黑色的识别调至一个较合理的范围，使误识别的概率大幅降低。对于起步时误识别终点射门区域红色的情况，经过调试，也已经基本避免。

调试后测试，机器人可以以极高的成功率在适当位置识别彩柱并发出持续两秒的蜂鸣声。

6.1.3 桥梁穿越功能调试及测试

第二项任务为桥梁穿越，主要任务为调试机器人上下桥的动作组，使其在保持平衡的前

提下，完成两个复杂动作。未经调试时，机器人的上下桥动作失误的主要问题如下：

(1) 变换重心以保持平衡的过程容易晃动失衡导致倾倒。

(2) 由于桥上黑线较细，机器人在桥上巡线时容易丢失路线目标。

(3) 机器人在上下桥前的动作处于随机状态，若进行动作前姿态非正对向前，导致重心偏移，上下桥的动作容易发生倾倒。

针对以上问题进行相应调试。首先是上下桥的两个动作组，为了使机器人能稳定重心，保持平衡，略微上调动作间的延迟，并调大动作的幅度，以避免上下桥时后脚被桥的边沿绊倒。经调试，其上下桥的动作稳定性较为提升。其次，对于桥梁上黑线不容易识别的问题，通过调整视觉识别中黑色的对比度及饱和度使目标更加清晰，更易被机器人识别到。为使机器人在执行上下桥动作前保持正对向前的姿态，增加了一个自我矫正的环节，使其在执行动作前进行左右移动来调整姿态。

调试后测试，机器人能以较高成功率实现上下桥前姿态的调整并完成上下桥的动作，且在桥梁上能成功巡线前进。

6.1.4 矮门穿越功能调试及测试

根据比赛要求，完成矮门穿越功能包括识别矮门和低身穿越矮门两个部分，且不能出界或倾倒。在调试前，机器人在识别矮门时由于灯光造成的阴影，易将绿色识别为黑色，造成识别错误，不能进行低身穿越的动作。其次在低身穿越时，由于重心较低，机器人容易产生左右摇摆，当幅度较大时会造成倾倒。

因此，分别对这两种情况进行调试。首先调试视觉识别部分，调整绿色的对比度及饱和度，使机器人能在有阴影的环境下以较高成功率识别到绿色矮门。为确保机器人能成功通过矮门，略微缩短其识别距离，使机器人能够在更近的距离识别到矮门。其次，调整低身前进的动作组。降低重心变换时的动作幅度大小和步频、步幅。此举虽然会略微增加通过矮门所用的时间，但稳定性却大大提升。在测试中，机器人能以较高成功率在适当距离识别到矮门并低身前进，以较为稳定的姿态通过矮门。

6.1.5 自主射门功能调试及测试

最后一项比赛任务为自主射门，需要机器人在目标小球前调整姿态，将小球成功射入球门内。在调试前，机器人射门的精准度极低，且会出现识别不到目标小球或球门，持续调整姿态的情况。

对于这些问题，首先调试视觉识别中紫色小球及红色球门两种色彩的对比度及饱和度，并调整头部摄像头的角度，使两种颜色能同时清晰地展示在机器人的视野中。其次，当机器人识别到黑色交叉线进入射门动作时，机器人离目标小球距离较远，通过添加调整姿态的环节，使机器人离目标小球更近，且保持正对球门的姿态。由于机器人使用右脚进行射门，往往需要调整站位姿态后才进行射门。因此，通过略微降低其瞄准时调整姿态的动作幅度，使其能更加精准的射门。

调试后测试，机器人能以较高的成功率识别到目标小球和球门，并以较好精准度射门。

6.2 注意事项

(1) 机器人运动时，请将机器人远离操作员的脸、眼睛，避免误伤。

(2) 机器人运动时，请勿手指放在机器人关节活动范围，避免夹伤。

(3) 机器人上电后，请不要强行扳动关节，否则容易造成关节损坏。

(4) 机器人运动时，谨防从高处边缘跌落。

(5) 机器人持续运行时间过长，舵机会发热，需要让机器人“休息”，直到舵机冷却，方可继续运行。

(6) 机器人摄像头采用手动对焦方式，请避免在调试好之后再次碰触摄像头，否则可能造成失焦。

(7) 机器人调试测试时，请保证测试场地灯光照明稳定，否则可能导致识别错误。

(8) 机器人的舵机和舵机法兰属于易耗品，长时间或过度使用后需要更换。

7 结论

双足机器人是属于机器人领域中极其重要的研究环节，它结合了人工智能，步态控制等，在行走过程中具有很大的灵活性和不稳定性。以上内容以 AiNex Pro 智能识别双足机器人为研究对象，在确定双足机器人机构总体自由度数量、自由度布局和机械设计方案的要求后，对整体结构进行了全面的设计、组装及调试，完成了一套较为完整的双足机器人机构，完全实现了预期的任务目标要求。对双足机器人的稳定性、控制策略、功能测试和智能识别等内容进行了概述，提出了创新设计和未来改进方案。

本文提出在机器人执行上下桥动作前增加自我矫正这一环节，通过左右移动调整姿态以增加成功率；在机器人执行自主射门动作前增加调整姿态这一环节，使机器人与小球距离更近并正对球门，以增加精准度等通过优化算法、提升控制稳定性的创新点。

未来改进有如下方向：优化设计中机器人重心的建立环节；利用更优质的传感器；开发新型关节驱动器优化算法以提升对外部未知环境的感知。双足机器人的作用不仅在竞赛机器人的创新实践，未来其和生活的联系也将会更加密切，对它的研究也会更加深入。

在此感谢“中国工程机器人大赛暨国际公开赛”提供的宝贵机会；感谢幻尔科技 Hiwonder 给予的研究经验；感谢西交利物浦大学的大力支持；感谢陈敏、张权老师的悉心指导；最后谢谢本文全体作者每个灯火通明的夜。

参考文献

- [1] 徐莉, 刘振方, 王建丞, 等. 仿人机器人综述[J]. 黑龙江科学, 2013, 4(7): 57-61.
- [2] 阮晓钢, 仇忠臣, 关佳亮. 双足行走机器人发展现状及展望[J]. 机械工程师, 2007(2): 17-19.
- [3] W. Song, M. Minami, T. Maeba, Y. Zhang et al. Visual Lifting stabilization of dynamic Bipedal Walking[J]. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Bled, Slovenia, 2011: 345-351.
- [4] B.-S. Kim, K.-M. Nam, J.-J. Kim et al. Research for gait stability of biped walking using vision[J]. ICCAS, 2010: 1414-1418.
- [5] 徐历洪, 邹光明, 余祥, 等. 双足机器人平地行走步态规划的研究[J]. 机械设计与制造, 2019(4): 230-239.
- [6] G. Lee, M. Minami, A. Yanou, 等. Walking analyses of a humanoid by visual-lifting approach[J]. IEEE ISR, 2013: 1-6.
- [7] 宋宪玺, 周烽, 梁青, 等. 双足机器人上楼梯步态的规划与控制[J]. 计算机仿真, 2011, 28(4): 176-180.
- [8] 李海军. 高自由度双足机器人数学模型及步行控制研究[J]. 文化创新比较研究, 2018(19): 115-117.
- [9] D. Djoudi, C. Chevallereau, and J. Grizzle. A path-following approach to stable bipedal walking and zero moment point regulation[J]. IEEE, 2007: 3597-3602.
- [10] C. Chevallereau, D. Djoudi, and J. Grizzle. Stable bipedal walking with foot rotation through direct regulation of the zero moment point[J], IEEE, 2008:390-401.
- [11] M. Suzuki. Visuo-Motor Coordination in Bipedal Humanoid Robot Walking[J], Second International Conference on Future Generation Communication and Networking Symposia, 2008:207-208.
- [12] S. G. Lee, C. H. Cho, Y. S. Hong, et al. "On-line Control Algorithm of a Quadruped Walking Robot Based on Static Walking Model and Tilting", Submitted to J. of the Korean Society of Precision Eng., 1999.
- [13] 明子成, 王雨, 王俊霞, 等. 竞赛机器人巡线算法的优化设计[J]. 中国信息技术教育. 2016, (11): 61-63
- [14] 张宁. 一种基于线阵 CCD 的真彩色循迹传感器的研究[J]. 甘肃科技纵横. 2007, 36(5)
- [15] 腾游, 刘安东, 俞立. 采用内点法和图像反馈的机器人视觉伺服预测控制[J]. 小型微型计算机系统. 2021, 42(1)

附录

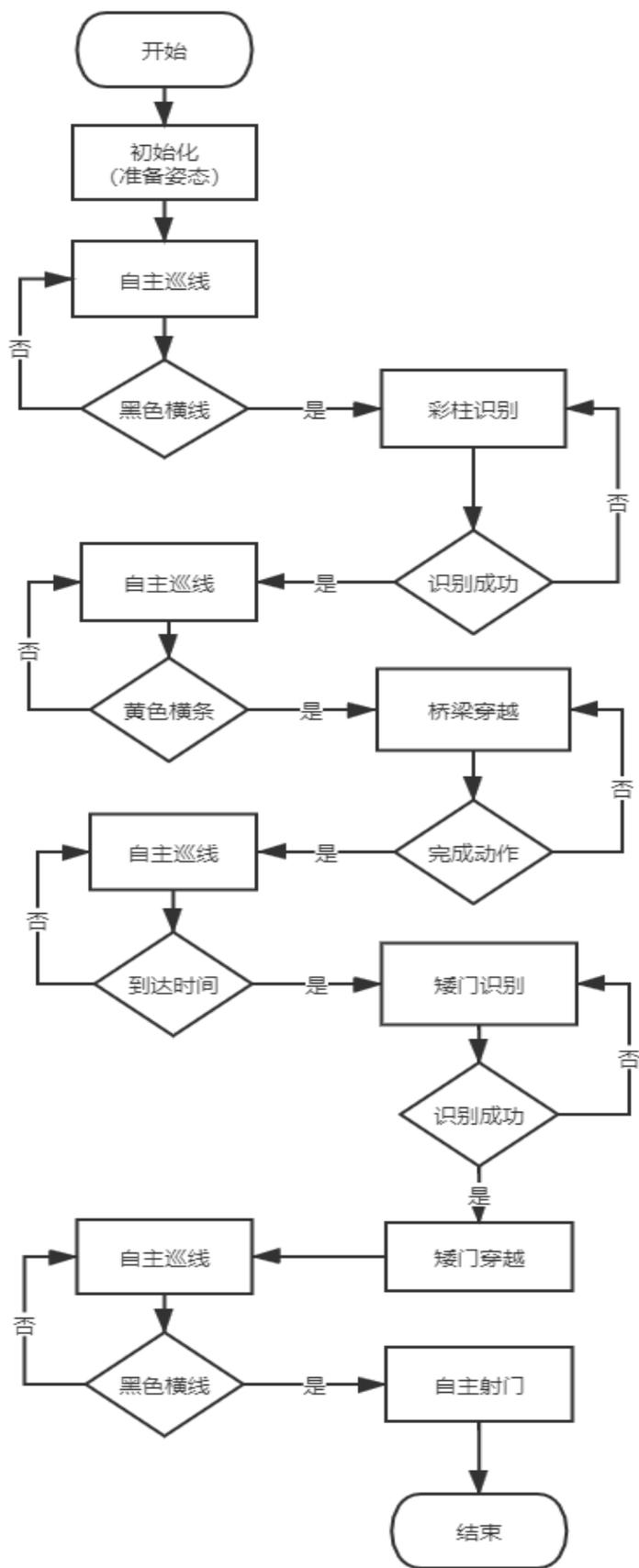


图 21 主程序框架流程图