



学 校 代 码 10459

学号或申请号 201322172104

密 级

郑 州 大 学

专业硕士学位论文

基于运动动力学武术擂台机器人
攻防控制研究

作 者 姓 名： 陈 昊

导 师 姓 名： 邓计才 教授

专业学位名称： 集成电路工程

培 养 院 系： 信息工程学院

完 成 时 间： 2016 年 5 月

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者： 陈昊

日期：2016 年 5 月 25 日

学位论文使用授权声明

本人在导师指导下完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属郑州大学。根据郑州大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权郑州大学可以将本学位论文的全部或部分编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或者其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该学位论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为郑州大学。保密论文在解密后应遵守此规定。

学位论文作者： 陈昊

日期：2016 年 5 月 25 日

A thesis submitted to
Zhengzhou University
for the degree of Master

**Research on Attack and Defense Control of MartialArts
Competition Robot based on Kinodynamics**

ByHao Chen
Supervisor: Prof. Jicai Deng
Integrated Circuit Engineering
School of Information Engineering
May , 2016

摘要

在智能移动机器人的研究中，自主移动性是一个非常关键的问题，在移动过程中能否准确、快速地对周围环境做出反应，实时避开前进过程中的障碍物并且不间断的移动到目的地是非常重要的，路径规划和避障算法的研究则是其核心点之一。近年来，随着国家对机器人产业和大学生创新实践的鼓励，中国机器人大赛越来越受到各方关注。武术擂台赛作为中国机器人大赛中一个很有中国特色的重要项目，需要将机器人的自主移动性研究运用到实践中，尤其是移动中的路径规划和避障。

现有的路径规划和避障算法大多没有考虑机器人的运动动力学限制和几何参数，在实际机器人应用中会出现物理可行性和泛用性等问题；现有的武术擂台机器人攻防控制策略，主要靠经验和尝试，精确性和灵活性等方面都存在不足。针对于此，本文提出了一种基于虚拟力的运动动力学模型，并将其应用于武术擂台机器人，制定出一套攻防一体的武术擂台机器人攻防控制策略。论文的主要工作如下：

(1)设计了武术擂台机器人的结构与系统，分析了机器人整体结构、控制系统、传感器检测系统、电机驱动模块和蓝牙串口模块。

(2)提出了一种基于虚拟力控制的运动动力学建模方法，该方法考虑了武术擂台机器人的几何参数和运动动力学限制，且每个参数都有明确的物理意义。进行了参数灵敏度分析，并构建了运动控制器。

(3)制定了以运动建模为基础的武术擂台机器人攻防控制策略，构建了运动中攻防一体的攻防控制模型。

(4)完成了仿真实验和实际机器人实验，对实验结果进行了分析，并提出了改进方案。

实验结果表明，本文提出的运动模型能很好地帮助机器人完成避障规划任务，基于运动建模构建的攻防控制模型可有效地改善武术擂台机器人的避障效率和攻防强度，增强其对抗的竞争力。

关键词：武术擂台机器人，运动动力学，虚拟力，避障规划，攻防策略

Abstract

Autonomous mobility is a very critical issue in the research of intelligent mobile robots. It is very important to make an accurate and quick response to the surrounding environment, and to avoid the obstacles in real time and move to the destination without interruption in the process of moving. The research of path planning and obstacle avoidance algorithm is one of the key points. In recent years, with the encouragement to the robot industry and students' innovation practice by the state, China robot competition attracted more and more attention. As an important project with Chinese characteristics, martial arts competition need to use research of autonomous mobility into practice, especially path planning and obstacle avoidance in the process of moving.

Most existing path planning and obstacle avoidance algorithm do not consider kinodynamic restrictions and geometric parameters of the robot, which exists physical feasibility and generic issue in the actual robot application. Current attack and defense control strategy of martial arts competition robot mainly depends on experience and try, which exists problems of accuracy and flexibility. In light of this, a kinodynamic model based on virtual force is presented and applied on the martial arts competition robot to develop an attack and defense control strategy integrating attack with defense in this paper. The main work of this paper is as follows:

(1) The structure and system of martial arts competition robot are designed. The overall structure, control systems, sensor systems, motor drive module and bluetooth serial module are analyzed.

(2) A kinodynamic modeling method based on virtual force control is given, which takes into account the geometry parameters (each parameter has a clear physical meaning) and the kinodynamic restrictions of martial arts competition robot. The parameter sensitivity analysis is carried out, and the motion controller is constructed.

(3) An attack and defense control strategy of martial arts competition robot based on motion modeling is formulated. An attack and defense control model integrating attack with defense in the process of moving is constructed.

(4) The simulation and the actual robot experiment are completed. The experimental results are analyzed, and the improved schemes are proposed.

The experimental results demonstrate that the motion model proposed in this paper can help the robot accomplish the task of obstacle avoidance planning. The attack and defense control model based on motion modeling can effectively improve the obstacle avoidance efficiency and strength of attack and defense of martial arts competition robot, and can enhance competitiveness of confrontation.

Key Words: martial arts competition robot, kinodynamics, virtual force, obstacle avoidance planning, attack and defense strategy

目录

摘要	I
Abstract.....	II
1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 路径规划方法分类	2
1.2.2 现有路径规划和避障算法分析	3
1.3 中国机器人大赛武术擂台赛	7
1.4 论文的主要内容	8
2 武术擂台机器人结构与系统设计	10
2.1 机器人整体结构	10
2.2 机器人控制系统设计	11
2.2.1 MCU 选型	11
2.2.2 控制卡电路设计	12
2.2.2.1 最小系统电路	12
2.2.2.2 电源电路	12
2.2.2.3 JTAG 电路	13
2.2.2.4 ADC 接口电路	14
2.2.2.5 IO 口电路	14
2.2.2.6 电机驱动接口电路	15
2.2.2.7 串口和下载口电路	15
2.3 传感器检测系统设计	16
2.4 电机驱动模块	17

2.4.1	逻辑控制与 PWM 输入电路	17
2.4.2	电源电路	18
2.4.3	电机控制芯片及输出接口电路	18
2.5	蓝牙串口模块	19
2.6	本章小结	21
3	机器人运动建模与分析	23
3.1	运动动力学建模	23
3.1.1	运动方程建立	23
3.1.2	坐标系转换	25
3.2	参数灵敏度分析	26
3.3	虚拟力建模	32
3.4	运动控制器构建	34
3.5	本章小结	36
4	武术擂台机器人攻防控制策略	37
4.1	整体对抗策略	37
4.2	机器人姿态调整	39
4.2.1	边缘检测	39
4.2.2	朝向调整	39
4.3	防守策略	40
4.3.1	机器人动态路径规划和避障	40
4.3.2	具有攻击目的的防守策略	41
4.4	攻击策略	43
4.5	本章小结	44
5	实验结果与分析	45
5.1	转动 90°仿真实验	45
5.2	虚拟力仿真实验	48
5.3	机器人避障实验	49

5.4 机器人对抗实验	51
5.5 本章小结	52
6 总结与展望	53
6.1 总结	53
6.2 展望	53
参考文献	55
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果	58
个人简历	58
研究成果	58
致谢	59

1 绪论

1.1 研究背景

机器人是一种可编程和多功能的操作机，或是为了执行不同的任务而具有可用电脑改变和可编程动作的专门系统^[1]。机器人的任务是协助人类更优秀地完成工作，例如可以用于建筑行业、制造业等，或是一些地形复杂、环境不适宜人类进入等情况下的作业。根据应用环境不同，机器人可以被划分为两个大的类别，即工业机器人和特种机器人。工业机器人是一种面向工业领域的多关节机械臂或具有多自由度的机器人，用它研究的运动学标定、运动规划、控制^[2-3]等已有较为成熟的方案；而特种机器人主要包括服务机器人、农业机器人、军用机器人等。

近年来，国内外对机器人技术的发展越来越重视，机器人技术被认定是对未来新兴产业发展具有深远影响和重要意义的高新技术之一^[4]。在互联网技术、MEMS 技术、物联网技术等高新技术的发展和推动下，机器人技术正从传统的工业和制造领域迅速向医疗、教育、服务、娱乐、勘探、救援等领域扩张，科研人员也在不断深入研究和开发用于不同领域的机器人系统^[5-6]。如今，机器人系统已在工厂自动化生产、监控系统、AGV（自主引导车）、质量控制系统、抗灾和医疗辅助等领域得到广泛应用。不仅如此，机器人和普通大众的关系也越来越紧密，扫地机器人、家用报警机器人等已走进更多的家庭中，给我们的生活带来了不少方便。

作为机器人领域的重要组成部分，智能移动机器人是一类能够通过传感器感知环境和自身状态，实现在有障碍物的环境中面向目标的自主运动，从而完成一定作业功能的机器人系统^[7]。智能移动机器人在工业生产和日常生活中发挥越来越关键的作用，并且作为一种有效工具与试验平台，用来帮助探索人类思维模式，研究复杂智能行为如何产生^[8]。通常，一个具有完全自主移动能力的智能移动机器人应具备以下特征^[9]：

- (1)能够获取环境的相关信息；
- (2)能够在没有人为干涉的情况下较长时间地工作；
- (3)无需人工辅助，能够在整个工作环境中整体或部分运动。

移动机器人与其他类别机器人的最大不同之处，就在于强调其“移动”这一重要特性。因此，在智能移动机器人的研究中，自主移动性是一个非常关键的问题，在移动过程中能否准确、快速地对周围环境做出反应，实时避开前进过程中的障碍物并且不间断的移动到目的地是非常重要的^[9]。实现机器人的路径规划和避障，需要整个机器人系统各部分的协调配合，要考虑环境信息获取、路径规划和避障算法、机器人运动控制等多方面内容，而路径规划和避障算法的研究则是其核心点之一。

1.2 研究现状

1.2.1 路径规划方法分类

根据现在已有的研究状况，移动机器人路径规划的方法主要可以划分成三种类型：基于事例的学习规划方法，基于环境模型的规划方法，基于行为的路径规划方法^[9]。

基于事例的学习规划方法通过对以往经验的总结和学习来进行问题求解，当遇到新的事例时，可以通过比较事例库中与当前状况相似的事例来获得该情况下的解决方法。把该方法应用于移动机器人路径规划时的主要思路是：利用路径规划过程中用到的或已经产生的信息（这些信息包括路径信息和环境信息等）建立出一个事例库，事例库中的事例可以利用某种索引方法随时取出；然后，把当前事例（由规划任务和环境信息等共同决定产生）和事例库里的事例实施比较，来匹配出一个相似度最高的事例，并对这个事例进行修改和调整来得出最终结果；最后，把这个已经解决的事例再加入到事例库中，以便于下次有新的路径规划任务时调用。这种基于事例的学习规划方法随着事例库的不断扩充，准确度将逐渐提升，但规划速度也将由于需要匹配的事例越来越多而有所下降。

基于环境模型的规划方法先进行机器人运动环境模型的建立，然后通过对环境模型的分析来制定合理的移动轨迹。按照已知环境信息不同的完整程度，该方法可以划分为全局路径规划（环境信息完全已知）和局部路径规划（环境信息完全未知或部分未知）^[10]。全局路径规划^[11]中环境信息处于预先知道的状态，因此其规划思路是尽量实现最优的规划效果。而局部路径规划^[12]处于环境信息缺失的状态，机器人没有可以参考的先验信息，因此优先考虑机器人的避

障效果，而非路径是否最优。

基于行为的路径规划方法将路径规划问题分解成许多彼此之间相对独立的行为单元，如检测、跟随、目标制导、躲避等，每个单元各司其职、相互配合来完成整个规划。该方法又可以细分为反射式行为、反应式行为和慎思行为 3 类。反射式行为和人类的膝跳反应相类似，是一种瞬时应激性本能反应，用于迅速对突发状况做出反应，如机器人在移动过程中突然转向等，但这种行为智能性不足，通常配合其他方法来应用。反应式行为最初的提出者是 Brooks^[13]，该行为中机器人直接读取传感器传输回来的数据来制定下一个动作，以便于及时对未知环境状况的变化作出相应的反应，但该方法缺乏对全局环境状况的认知，做出的动作或制定出的路径可能不是最优的，因此在复杂环境状况下的避障规划效果不够理想^[14-16]。慎思行为是利用已知的环境模型制定出运动到特定目标点的最优路径和动作，比较适合复杂静态环境中的避障规划，但该行为需要较多时间来完成动作，所以会存在对突发状况应对不及时的问题。基于行为的路径规划方法在家庭服务机器人中被广泛应用，如刘瑜等人研制的两代自主智能吸尘机器人样机，引入了基于行为的思想，提高了吸尘机器人对环境的适应度，提高了吸尘工作效率^[17]。

如今，随着智能移动机器人被应用到更多的领域，对路径规划和避障效果的要求也逐渐提高，如果只使用单一的规划方法在有些情况下不能较好地使避障规划问题得以解决^[18-19]。因此当今的发展趋势是多种不同方法配合使用，其中，把反应式行为和慎思行为相结合，能更好得在低复杂度环境、目标明确的路径规划任务中发挥效果。

1.2.2 现有路径规划和避障算法分析

目前为止，已经有许多移动机器人的避障规划算法被提出，而对这些算法的选择和应用也直接影响到不同场景下移动机器人的路径规划和避障效率。现有的机器人避障规划算法，主要有自由空间法，栅格法，可视图法，人工势场法，遗传算法，模糊逻辑算法，人工神经网络法，蚁群算法，模拟退火算法，A*算法，滚动窗口算法，RRT 算法等。

自由空间法中，移动机器人的起点、终点、移动方向和障碍物位置等都是已知的，且一般把障碍物外形假设为多边形，采用凸多边形、锥形等一些简单的几何形状来构造出自由空间，并且把自由空间表示成连通图，在全局信

息已知的情况下，通过选择中间位置来决定最优路径；该方法灵活性较高，且连通图重构不会受到起始点与目标点的影响，但算法复杂度高，障碍物较多时获得最优路径成功率低^[20]。

栅格法把机器人的运行环境划分为具有不同二值信息的网格单元，使用尺寸大小一样的栅格来划分机器人的工作空间，栅格大小以机器人尺寸为参考，根据栅格内是否有障碍物划分为障碍物栅格和自由栅格，用栅格作为单位来记录环境信息，并通过优化算法来完成路径搜索；如果想要有较高的分辨率，就需要把栅格划分的较小，这就导致存储环境信息需要很大的存储空间，尽管 Faverjon、A.Elft 等人对该方法进行了改进，然而其避障规划效率仍然不高，且计算量较大^[21-23]。

可视图法把机器人、障碍物、目标点及运动轨迹中的各个位置视作一个个点，每个点相互之间的连线，都不能穿越障碍物，这样，寻找一条与障碍物不交叉的起始点和目标点连线以得到可视图，在这些连线中，路径和长度各不相同，在其中寻找一条最短路线即为最优路径规划，从而简化机器人避障问题为求最短路径问题，但该方法灵活性低，复杂环境下运行缓慢^[24-25]。

人工势场法由 Khatib 首先提出，假想机器人处在一个人工受力的虚拟势场中，把机器人在实际环境中的移动转化为在虚拟势场中的移动，机器人移动的目标点对机器人产生吸引力，环境中的障碍物对机器人产生斥力，通过引力和斥力的共同作用产生合力，机器人的运动速度和方向最终由合力决定；该方法计算量小，便于机器人运动的实时控制，但由于对全局环境信息的辨识不足，存在目标点不可达、局部最小点等问题^[26-27]。

遗传算法是由 J.Holland 首先提出的一种以自然选择和自然遗传为基础的随机化全局搜索算法，把“适者生存”这个基础的达尔文进化论引入到串结构，并在串间进行随机又有组织的信息交换，算法进行过程中优良品质会逐渐保留下来并进行组合，进而不断产生最佳个体，它使用简易编码技术表示出各式各样的复杂结构，对各组编码执行优胜略汰的自然选择和遗传操作，进而得到需要的组合，以便于确定搜索方向；该算法具有高效的避障路径规划和搜索能力，但初始化种群会使后续计算的复杂度有所增加，并且很难确定遗传操作的算子^[28-29]。

模糊逻辑算法由 Nedunaqdi 首先提出，其主要原理是把机器人所处运行环境里的所有障碍物进行模糊化处理，它仿照生物的避障思路，用“思想感觉”指

导机器人的运动，该算法依据移动机器人所在的环境位置，通过预先设定好的规则库得出路径规划使得机器人完成所需的行动；该方法能利用先验经验作为控制信号，对数据精度要求不高，具有较好的稳定性和统一性，但很难建立完整的模糊逻辑规则，应用难度较高^[30-31]。

人工神经网络法模拟生物神经系统的处理方法，相互连接大量的神经元来组成系统，神经网络是并行的分布式系统，其中包含了多层次的处理单元，它们通过各种不同方式连接，神经网络对输入的数据进行非线性变换，从而完成从数据信息到属性的分类和划分；它不需要系统提供非常精确的环境模型就有很高的处理速度，具有自适应性和学习能力，但该方法映射关系不好建立^[32-33]。

蚁群算法模拟了蚁群的相互协作过程，每只蚂蚁在候选解空间中各自独立搜索解并且在搜索到的解上留下一定的信息量，解的性能越好则蚂蚁留在该解上的信息量就越大，而信息量越大的解被再一次选中的可能性就越大。在算法开始时所有解上面的信息量相同，随着算法的进行较优解上的信息量也会逐渐增加，如此，算法最终将收敛到最优解或者近似最优解上。该算法为并行搜索，能同时寻找最优路径，但计算量较大，搜索时间较长，应用范围有限^[34-35]。

模拟退火算法模拟了热力学中粒子系统降温这一过程，来达到求解路径规划问题极值的目的，当孤立的粒子系统温度以足够慢的速度降低的时候，系统会处于一种近似的热力学稳定状态，最终系统将会达到自身的最低能量状态，此时即为能量函数所能达到的全局极小点，其物理背景为统计力学模型和固体退火的物理现象；该算法可避免局部极小值问题，但收敛条件较为苛刻^[36-37]。

A*算法是一种启发式的避障规划算法，通过对比来选择合适的估价函数，进而实施动态搜索策略，从而求解出最优路径规划；正是由于引入了启发式函数，使得机器人所需搜索的环境空间有所减少，因此实时性较好，然而其规划出的路径较为粗糙，路径优化比较差，在复杂环境中搜索效率不高^[38-39]。

滚动窗口算法中机器人上安装了许多传感器，在其运动过程中在前方建立半径为 R 的滚动窗口，这个窗口对前方障碍物信息进行实时的探测，从而建立起一个外部环境模型，接着使用启发式算法生成优化子目标，并制定出相应的移动策略，如此，滚动窗口不断更新障碍物信息并生成优化子目标，使得移动机器人最终到达目标点；该算法信息存储量小、实时性好，得出的路径较为优化，但在复杂环境下该方法执行困难，路径规划失败率高^[40]。

RRT 算法（快速扩展随机数算法）采用了随机采样的搜索方法，即不去建

立外部空间映射，而是通过一个优化策略采样外部空间的信息，从而执行最佳路径规划策略，具体原理是前一个节点通过搜索得到路径后到达新节点，机器人在运动过程中，不断搜索前方比较优化的新节点，并最终到达运动目标点；该算法不用进行预处理，且不需进行复杂的路径转换步骤，得出的路径可直接应用于机器人路径规划策略，但对全局环境依赖比较大，避障实时性差^[41-42]。

表 1.1 所示，为一些主要的路径规划和避障算法总结。

表 1.1 路径规划和避障算法总结

算法名称	优点	缺点
自由空间法	灵活性较高	复杂度高，障碍物多时成功率低
栅格法	障碍物模型容易建立	计算量大，避障效率低
可视图法	可寻求最短路径，搜索时间短	灵活性低，复杂环境运行缓慢
人工势场法	计算量小，便于实时控制	存在局部最小点问题
遗传算法	多点搜寻，全局优化	复杂度高，遗传算子难确定
模糊逻辑算法	对数据精度要求不高	很难建立完整的模糊逻辑规则
人工神经网络法	具有自适应和学习能力	映射关系不好建立
蚁群算法	并行位置，同步寻优	计算量大，搜索时间长
模拟退火算法	避免局部极小值	收敛条件较苛刻
A*算法	搜索效率高，实时性好	路径粗糙，优化性差
滚动窗口算法	算法简洁，信息存储量小	复杂环境下失败率高
RRT 算法	不需预处理和复杂路径转换	对全局环境依赖大

上述方法都在一定程度上提高了机器人路径规划和避障的成功率，但大多没有考虑机器人的运动动力学限制和几何参数，在实际机器人应用中会出现物理可行性和泛用性等问题。

1.3 中国机器人大赛武术擂台赛

近年来，随着国家对机器人产业和大学生创新实践的鼓励，中国机器人大赛越来越受到各方关注。武术擂台赛作为中国机器人大赛中一个很有中国特色的重要项目，既具有较强的观赏性，又融合了传感器、嵌入式、运动控制等多项技术。

机器人武术擂台赛的比赛规则，简而言之就是：在指定的擂台上双方的机器人，双方机器人通过模拟中国传统擂台格斗的规则，相互击打或者推挤；如果一方机器人整体离开擂台区域或者是不能再继续行动又或是被对方机器人打倒，则另一方会得分，规定时间内得分多的一方获胜^[43]。比赛擂台场地如图 1.1 所示。

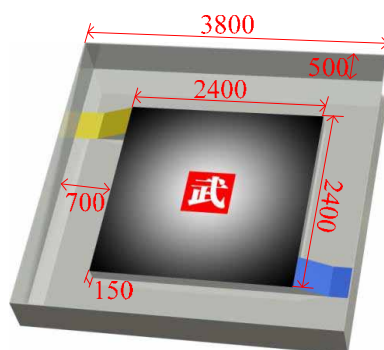


图 1.1 擂台场地

目前，很多院校都已积极参与到这项赛事中，很多研究者也针对擂台机器人的攻防策略提出了不同的思路和方法。赵宝森等人采用 8 个红外传感器检测模块检测己方机器人与对方机器人间的距离以及在擂台上的位置，实现机器人定位^[44]。李炜从传感器原理分析、材料选择、结构设计等方面进行了隐形设计的可行性分析^[45]。李卫国等人对武术擂台机器人的进攻策略和其注意事项进行了较为详细的阐述^[46]。李志凌等人通过灰度传感器与红外传感器相结合，提高目标搜寻的效率，以增强机器人的反应能力^[47]。周桔蓉等人^[48]、徐歌^[49]、沈新锋^[50]、孙旭日等人^[51]也都阐述了自己对武术擂台机器人整体设计和攻防控制策略的思路。然而，现有的武术擂台机器人攻防控制策略，主要靠经验和尝试，通过控制机器人前进、后退、左右旋转预先设定好的距离和角度来实现，精确性和灵活性等方面都存在不足。

1.4 论文的主要内容

近年来，随着国家对机器人产业和大学生创新实践的鼓励，中国机器人大赛越来越受到各方关注，武术擂台赛作为中国机器人大赛中一个很有中国特色的重要项目，需要将机器人的自主移动性研究运用到实践当中，尤其是运动过程中的路径规划和避障。现有的武术擂台机器人攻防控制策略，主要靠经验和尝试，通过控制机器人前进、后退、左右旋转预先设定好的距离和角度来实现，精确性和灵活性等方面都存在不足。

本文首先以采用差分驱动这类运动结构的机器人为例，给出了一种基于虚拟力的路径规划和避障控制模型。此模型只需要通过机器人自带的传感器进行检测并由中央处理模块进行分析计算即可实时制定运动轨迹，而不需要进行地图建模等复杂步骤，因此可以更好地运用到低成本、较简易、类似运动结构的武术擂台机器人上。本文研究的模型考虑了机器人的几何学参数，是一种考虑了运动学和动力学的模型，每个参数都有明确的物理意义，具有更好的泛用性。然后，再将此模型算法运用于实际的武术擂台机器人上，构建武术擂台机器人的攻防控制模型，并以此为基础对其攻防控制策略进行了改进，从而在其运动中真正实现了攻防一体。最后，进行仿真实验、机器人避障实验和机器人对抗实验，验证模型和策略的正确性及有效性。

全文共分为六个章节，章节结构和主要内容如下：

第一章绪论。阐述了机器人路径规划和避障算法的研究背景，分析了当前避障规划的主要方法及其优缺点，简要介绍了中国机器人大赛武术擂台赛的规则及场地条件，并简述了本文的主要工作和章节内容。

第二章武术擂台机器人结构与系统设计。介绍了武术擂台机器人的整体结构与系统设计，对以 STM32F103 为主控芯片的控制卡及其各部分电路进行了说明，并分别分析了机器人的控制系统设计、传感检测系统设计、电机驱动模块、蓝牙串口模块等。

第三章机器人运动建模与分析。构建了武术擂台机器人的运动动力学模型和虚拟力模型，对其进行了参数灵敏度分析，并以运动模型为基础构建了机器人运动控制器。

第四章武术擂台机器人攻防控制策略。阐述了武术擂台机器人的整体对抗策略，并分别分析了机器人姿态调整、防守策略、攻击策略，给出了一套基于运动动力学的攻防一体的武术擂台机器人对抗方案。

第五章实验与结果分析。先后进行四个实验，用于验证运动动力学建模、虚拟力建模和攻防控制策略的正确性及实用性，并对其实验结果进行分析总结。

第六章总结与展望。对本文内容进行总结，归纳了理论与实际应用中存在的问题及需要改进及完善的方面。

2 武术擂台机器人结构与系统设计

2.1 机器人整体结构

所开发的武术擂台机器人采用差分驱动的轮式结构，整体为正方形构型，底盘尺寸为 240mm*240mm，重量约为 3.8kg，金属外壳，全身黑色，四周装有多红外测距和红外光电开关传感器，使用 4 个轮子进行驱动。

机器人控制结构如图 2.1 所示，采用 ST（意法半导体）公司的 STM32F103 作为主控器，通过汇承蓝牙串口 HC-05 和上位机进行数据交换。红外光电开关传感器型号为 E18-D80NK，有效距离为 3-80cm；红外测距传感器采用夏普 GP2Y0A02YK0F，测量距离为 20-150cm；电机驱动采用 Infineon（英飞凌）的 BTN7971 芯片，电机使用冯哈勃 2342L012 空心杯减速电机，最大空转速度 8100r/m，扭矩 1.72N·m；控制卡和电机分别采用 7.4V、11.1V 锂电池供电。

控制卡作为机器人的核心，与其他各部分相连接：通过 IO 口连接红外光电开关传感器，通过 8 路 ADC 接口连接红外测距传感器，通过 2 路 PWM 和 IO 口连接电机驱动模块，通过串口连接无线蓝牙串口模块。而电机驱动模块则与电机相连接，控制机器人的运动。控制卡将传感器采集到的环境信息通过无线蓝牙串口传输给上位机，上位机进行分析计算后，再将结果传输回控制卡。

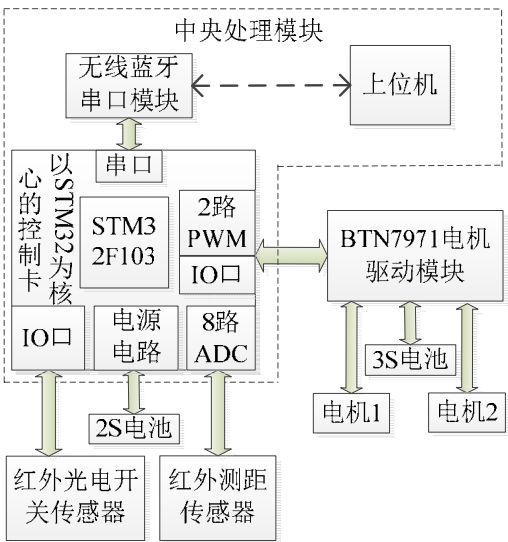


图 2.1 武术擂台机器人控制结构

传感器采集的信息传输到中央处理模块后，经过分析计算，给电机驱动模块下达指令控制电机转动，从而控制机器人的运动。中央处理模块作为机器人的“大脑”，分析和控制整个机器人的行动。而传感器，则作为机器人的“眼睛”，从周围获取环境信息。如图 2.2 所示，机器人装有 8 个红外测距传感器，每隔 45° 一个，其中 1 号传感器所在位置为机器人前部正中央；同时，还装有 4 个红外光电开关传感器，在机器人的前部和后部各有 2 个。在机器人运动过程中，红外测距传感器检测障碍物和机器人间的距离，红外光电开关传感器则用来检测擂台的边缘。

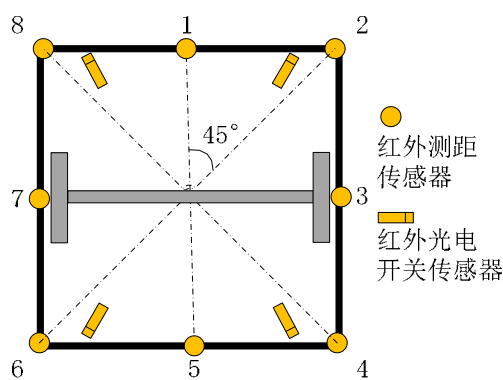


图 2.2 传感器布局

2.2 机器人控制系统设计

2.2.1 MCU 选型

如图 2.1 所示，机器人的控制卡与其他模块连接时，需要 2 路 PWM、8 路 ADC、串口、多路 IO 口等，需要的资源较多；机器人武术擂台赛对抗实时性强，对于作为控制卡核心的 MCU 的运算速度和效率等都有较高要求。综合多方面考虑，最终控制卡的核心芯片选用 ST（意法半导体）的 STM32F103，该芯片属于 Cortex-M3 系列。

STM32F103 拥有的资源包括：64KB SRAM、512KB FLASH、2 个基本定时器、2 个高级定时器、4 个通用定时器、3 个 SPI、5 个串口、2 个 IIC、1 个 CAN、1 个 USB、1 个 12 位 DAC、3 个 12 位 ADC、1 个 FSMC 接口、1 个 SDIO 接口以及 112 个通用 IO 口。该芯片的配置十分强悍，并且还带外部总线（FSMC）

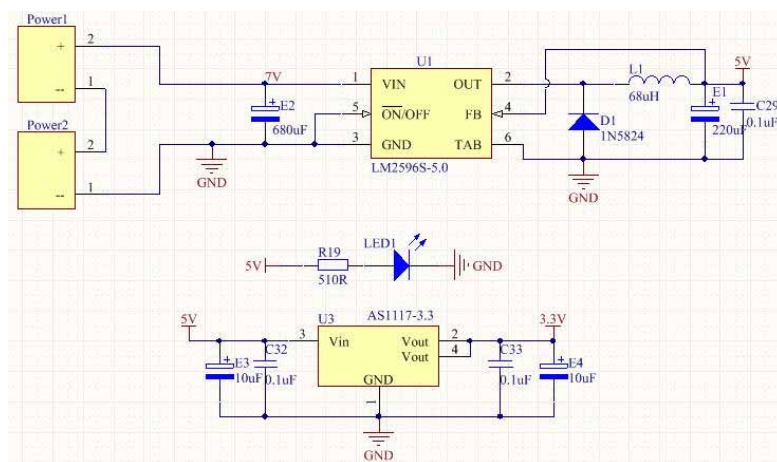


图 2.4 电源电路

电源电路共用到 2 个稳压芯片。LM2596S-5.0 是一款开关式稳压器，采用 TS5B_N 封装，输入电压最大值为 40V，输出电压为 5V，工作温度范围可从 -40°C 到 +125°C。AS1117-3.3 采用 TO-252 封装，可以把 LM2596S-5.0 稳压后的 5V 电压，再降为 3.3V。这两款芯片性能稳定，在嵌入式系统中都有着良好的应用。

2.2.2.3 JTAG 电路

JTAG (Joint Test Action Group，联合测试工作组)，主要用于下载和调试程序，进行芯片内部测试。JTAG 编程是一种在线编程方式，传统的编程调试方式是先对芯片进行预编程然后再把程序下载到板子上，而更加简洁高效的方式是先把器件固定到电路板上，然后再用 JTAG 进行编程调试，这样可以大大提高编程和调试的效率。

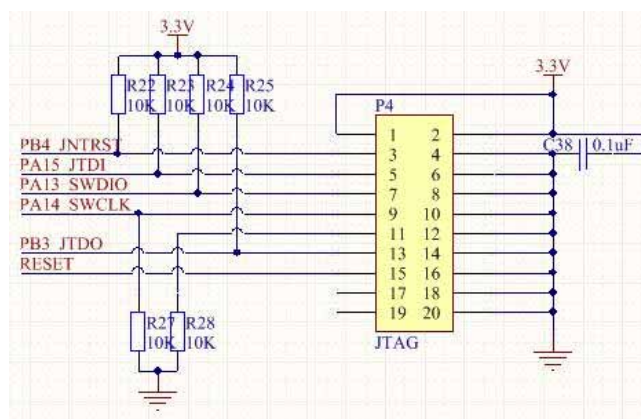


图 2.5 JTAG 电路

JTAG 电路如图 2.5 所示。控制卡采用标准的 20 针 JTAG 接口电路，通过 Jlink 仿真器与电脑相连，用于在线调试和下载程序，方便进行实验和程序优化。

2.2.2.4 ADC 接口电路

STM32 拥有 3 个 ADC，这几个 ADC 可以各自独立使用，也可使用双重模式。STM32 的 ADC 为 12 位逐次逼近型的模拟数字转换器，它拥有 18 个通道，可以测量 2 个内部和 16 个外部信号源，ADC 转换后的结果可通过右对齐或者左对齐方式存储于 16 位数据寄存器当中。它的最大转换速率是 1Mhz，换算成转换时间是 1us（此时 ADCCLK=14M，采样周期是 1.5 个 ADC 时钟）。

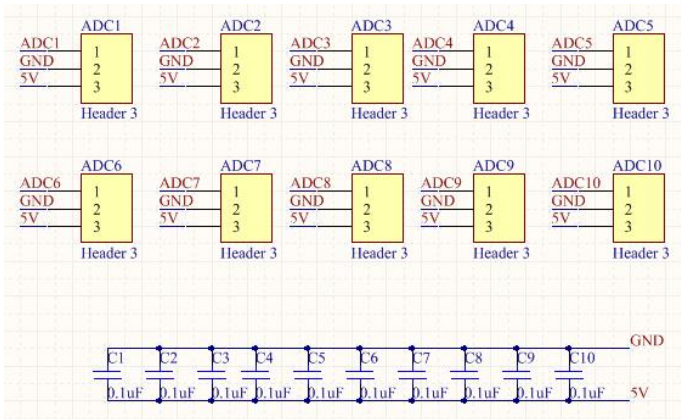


图 2.6 ADC 接口电路

ADC 接口电路如图 2.6 所示。控制卡引出 10 路 ACD 接口，主要用于和红外测距传感器相连接。插槽设计上，引出 ADC、GND 和 5V 电源，使得传感器的 3 线接口直接插到控制卡的 ADC 插槽上就能使用。

2.2.2.5 IO 口电路

如图 2.7 所示，控制卡共引出 12 个 IO 口接口，主要用于连接红外光电开关传感器。插槽设计上，引出 IO、GND 和 5V 电源，使得传感器的 3 线接口直接插到控制卡的 IO 口插槽上就能使用。

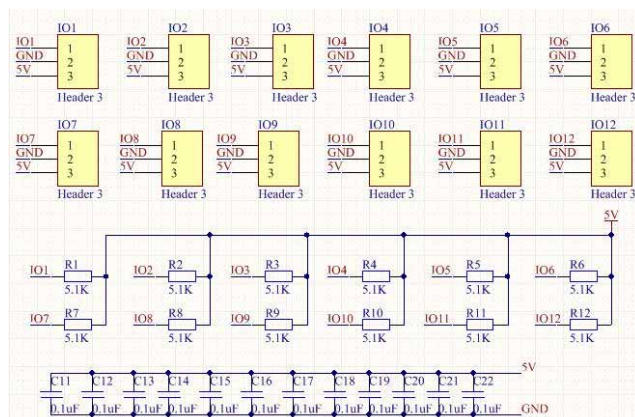


图 2.7 IO 口电路

2.2.2.6 电机驱动接口电路

电机驱动接口电路如图 2.8 所示，用于和电机驱动模块相连接，进而实现控制卡对电机的控制。控制卡上引出的 2 个电机驱动接口，为 3 针设计，包括一个 PWM 口、一个 IO 口和一个 3.3V 电压口，PWM 口用来控制电机的转速，IO 口用来控制电机的转向。

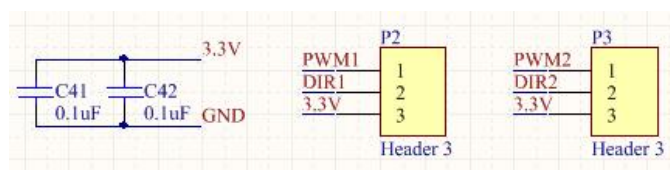


图 2.8 电机驱动接口电路

2.2.2.7 串口和下载口电路

串口和下载口电路如图 2.9 所示，串口 P1 使用的是 MCU 的串口 3，下载口 P5 使用的是 MCU 的串口 1。P1 用于外界和 STM32 之间进行串口通信，如连接串口蓝牙模块；P5 用于下载程序到 STM32，功能类似于 JTAG 口，不过只能进行下载，不能进行在线调试，且下载速度比 JTAG 慢许多。

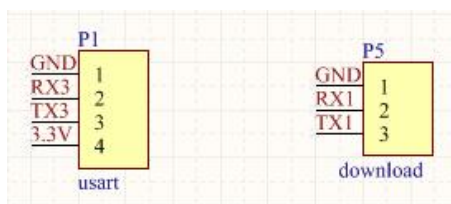


图 2.9 串口和下载口电路

2.3 传感器检测系统设计

传感器作为机器人的“眼睛”，从周围获取各种信息，对于机器人的路径规划和避障起到至关重要的作用。武术擂台机器人上用到的传感器，主要是 2 种：红外测距传感器和红外光电开关传感器。

红外测距传感器采用的是夏普 GP2Y0A02YK0F，有效测量距离是 20-150cm。它是一个距离测量传感器装置，由 PSD 集成组合（位置敏感探测器）、IRED（红外发光二极管）和信号处理器组成。由于采用三角测量法，物体的颜色、反射率、环境温度和操作持续时间一般不容易影响距离的测量。

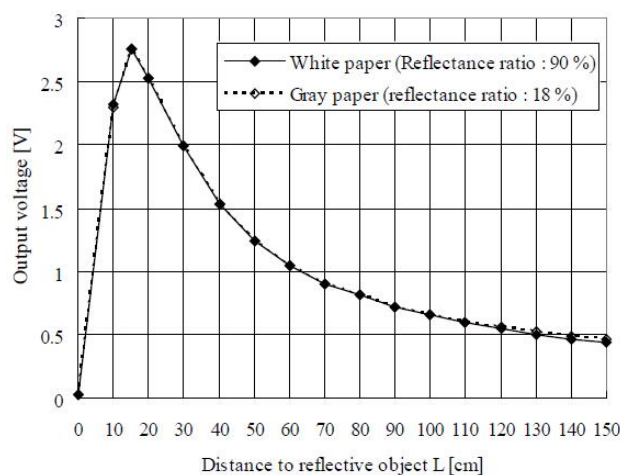


图 2.10 红外测距传感器距离-电压曲线

传感器共有 3 个管脚，分别是信号线 V_o ，地线 GND，电源线 V_{cc} 。其中， V_{cc} 给传感器供电，推荐电压值是 4.5-5.5V；信号线 V_o 输出的为电压值，不同输出电压对应不同的测量距离，其对应关系如图 2.10 所示。可以看出，当测量距离从 150cm 逐渐减小的过程中，输出电压值不断增大，距离为 15cm 左右时达到最大值；距离从 15cm 逐渐到 0 的过程中，输出电压值不断减小直到 0。武术擂台机器人使用了 8 个红外测距传感器，与控制卡的 8 路 ADC 接口相连接，如图 2.1 所示。

红外光电开关传感器型号为 E18-D80NK，有效距离是 3-80cm。这是一款收发一体的光电开关传感器，对障碍物的检测距离可根据需求通过传感器后部的旋钮来调节，它具有受可见光干扰小、探测距离远、易于装配、价格便宜、使用方便等特点。



图 2.11 红外光电开关传感器

如图 2.11 所示，传感器有 3 个管脚，分别为信号线、地线、电源线。电源采用 5V 供电，信号线根据传感器是否检测到物体，输出 0 或 1 两种数字量。武术擂台机器人共使用 4 个红外光电开关传感器，与控制卡的 4 个 IO 口相连接，如图 2.1 所示。

2.4 电机驱动模块

电机驱动模块通过 PWM、IO、MCUVCC 与控制卡相连接，其作用是放大控制卡的 PWM 输出信号，对电机进行速度和转向控制。电机驱动模块由 3 部分构成：逻辑控制与 PWM 输入，电源电路，电机控制芯片及输出接口电路。

2.4.1 逻辑控制与 PWM 输入电路

逻辑控制与 PWM 输入电路 主要由光耦 PS2801 和与非门 74HC00D 组成，如图 2.12 所示。

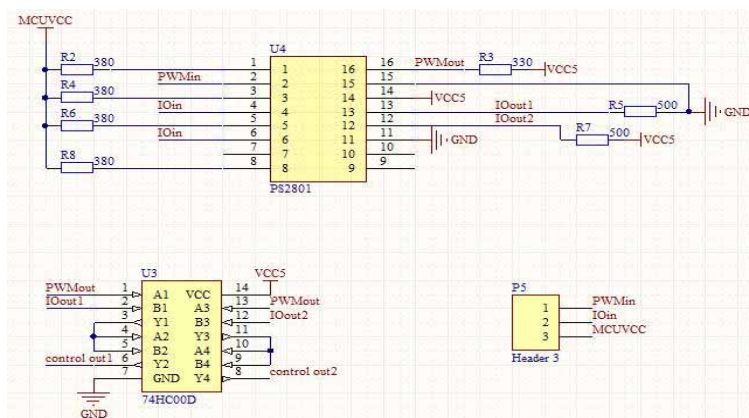


图 2.12 逻辑控制与 PWM 输入电路

光耦对输入、输出电信号起隔离和放大作用，光耦合器通常由三个部分构成：光的发射、光的接收及信号放大。PS2801 采用 SO16 封装，工作温度为-55℃到 100℃。74HC00D 为四 2 输入与非门，采用 SO14 封装，5V 供电，工作温度为 0~70℃。

2.4.2 电源电路

电源电路采用 LM2675 芯片，把 3S 电池提供的 12V 电压降为电机驱动模块需要的 5V 电压。电源电路如图 2.13 所示。

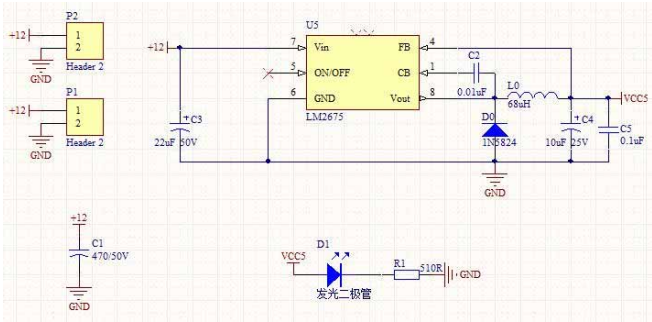


图 2.13 电机驱动模块电源电路

2.4.3 电机控制芯片及输出接口电路

电机控制芯片采用 Infineon（英飞凌）的 BTN7971，工作电压为 8V-18V，工作温度-40℃到+150℃，封装采用 TO-263-7。武术擂台机器人共使用 2 个电机驱动模块，左侧 2 个轮子共用左侧电机驱动模块，右侧 2 个轮子公用右侧电机驱动模块，如图 2.14 所示。这样设计，使得机器人左侧两轮速度相同，右侧两轮速度相同，虽是 4 轮结构，实际上是差分驱动的机器人。

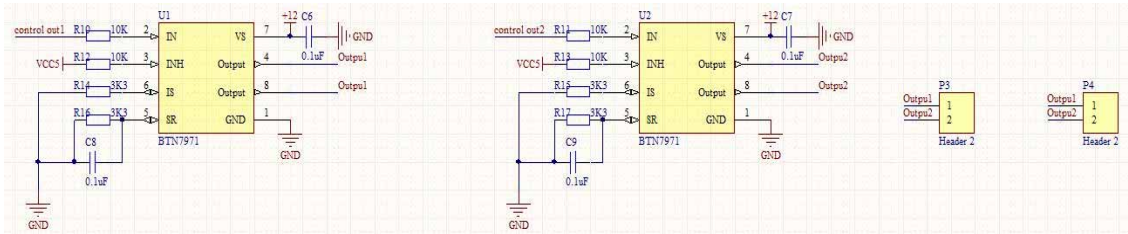


图 2.14 电机控制芯片及输出接口电路

经过此部分电路处理后，P3 和 P4 为波型相同的 PWM 波，P3 和 P4 分别与

前后电机相连接。当 PWM 波处于正半轴时，电机正向转动；PWM 波处于负半轴时，电机反向转动；PWM 波的占空比越高，则电机转速就越快，占空比越低，则电机转速就越慢。如此，通过 PWM 的变化来实现对电机转速和转向的控制。

电机驱动模块用于完成控制卡对电机的控制，而电机则是机器人运动行为的具体实施者，它带动轮子转动实现机器人前进、后退、转弯等动作。武术擂台机器人的电机选用冯哈勃 2342L012 空心杯减速电机，它的工作电压为 12V，空载转速为 8100r/m，减速后速为 120r/m；输出功率为 17W，扭矩 1.72N·m，堵转扭矩 5N·m；电机长度 42mm，出轴长度 35mm。电机实物图如图 2.15 所示，这款电机尺寸上符合武术擂台机器人的要求，且在对抗时能提供较大的扭矩，适合武术擂台对抗。



图 2.15 电机实物图

2.5 蓝牙串口模块

蓝牙串口模块使用星翼电子科技有限公司的 ATK-HC05。ATK-HC05 是一款高性能的主从一体蓝牙串口模块，可以同各种带蓝牙功能的电脑、手机、蓝牙主机、平板电脑、PSP 等智能终端配对，该模块支持非常宽的波特率范围（4800~1382400），并且模块兼容 5V 或 3.3V 单片机系统，可以很便捷的与多种产品进行连接，使用非常灵活、方便。它的基本特性如表 2.1 所示：

表 2.1 ATK-HC05 基本特性

项目	说明
接口特性	TTL, 兼容 3.3V/5V 单片机系统

支持波特率	4800、9600(默认)、19200、38400、115200、230400、46080、921600、1382400
其他特性	主从一体，指令切换，默认为从机；带状态指示灯和配对状态输出
通信距离	10m(空旷地)
工作温度	-25°C~75°C
模块尺寸	16mm*32mm

ATK-HC05 模块非常小巧，模块通过 6 个 2.54mm 间距的排针与外部模块相连接，模块外观如图 2.16 所示：



图 2.16 蓝牙串口模块实物图

图中从右到左，依次为模块引出的 PIN1~PIN6 脚。PIN1 为 LED，用于配对状态输出，配对成功会输出高电平，未配对输出会低电平；PIN2 为 KEY，用于进入 AT 状态，高电平有效；PIN3 为 RXD，模块串口接收脚，用于连接单片机的 TXD；PIN4 为 TXD，模块串口发送脚，用于连接单片机的 RXD；PIN5 为地 GND；PIN6 为电源 VCC。

模块与单片机连接最少只需要 4 根线：VCC、GND、TXD、RXD，VCC 和 GND 用于给模块供电，TXD 和 RXD 分别连接单片机的 RXD 和 TXD。模块可以兼容 5V 和 3.3V 单片机系统，对各类单片机系统都有较强的适应性。蓝牙串口模块与单片机系统连接示意图如图 2.17 所示。

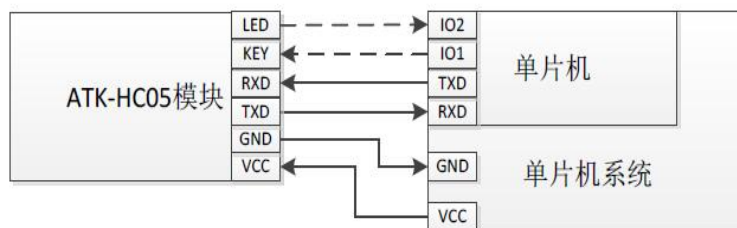


图 2.17 蓝牙串口模块与单片机系统连接示意图

蓝牙串口模块电路图如图 2.18 所示，主要使用 RT9193-33 和 HC-05 两块芯片。RT9193-33 是一款 3.3V 稳压芯片，用于为蓝牙串口模块提供稳定持续的 3.3V 电压。其输入电压最高 5.5V，输出电压 3.3V，工作温度 -40°C 到 +85°C，采用 SOT-23-5 封装。HC-05 是汇承科技有限公司出品的一款主从一体蓝牙芯片，具有低功耗、高性能无线收发、低成本等特点。无线收发灵敏度（误码率）可以达到 -80dBm；蓝牙 2.0 带 EDR，2Mbps-3Mbps 调制；内置 2.4GHz 天线，用户无需再调试天线；低电压 3.3V 工作，自适应跳频技术；存储温度 -40°C 到 +85°C，工作温度 -25°C 到 +75°C；谐波干扰 2.4MHz，发射功率 3dBm。

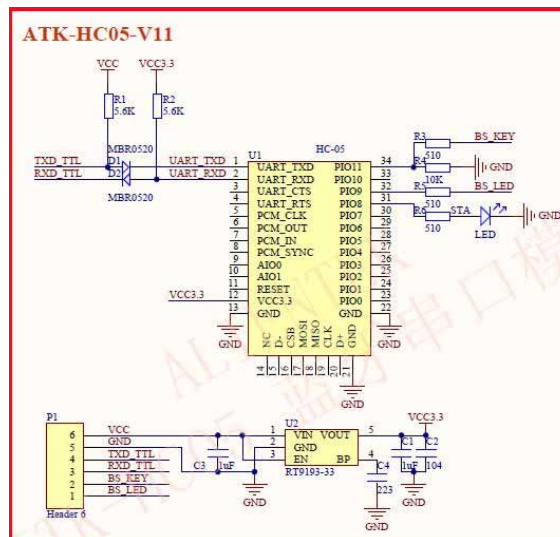


图 2.18 蓝牙串口模块电路

2.6 本章小结

本章首先介绍了武术擂台机器人的整体结构，给出了其控制结构总图和传

感器布局图。然后对以 STM32F103 为主控器的控制卡及其各部分电路进行了说明。接下来，对机器人的传感器系统、电机驱动模块、蓝牙串口模块等分别进行了介绍。

3 机器人运动建模与分析

3.1 运动动力学建模

3.1.1 运动方程建立

运动学 (kinematics), 是从几何的角度 (指不涉及物体本身的物理性质和加在物体上的力) 描述和研究物体位置随时间的变化规律, 与质量和受力无关。动力学 (dynamics), 主要研究作用于物体的力与物体运动的关系, 因而也关系到物体的质量。而运动动力学 (kinodynamics) 则是既考虑了运动学, 又考虑了动力学, 基于运动动力学的机器人要同时服从运动学和动力学限制^[53]。本节的运动动力学建模, 就是在考虑移动机器人几何参数和物理可实现性的前提下, 利用运动动力学定律对机器人的运动情况进行建模, 综合考虑力、速度、加速度、时间等因素, 给出机器人的运动方程, 使其运动具有理论指导, 从而提高其避障规划的科学性和准确性。

由牛顿运动定律可知, 物体的运动状态改变, 是由于受到了力的作用。机器人的实际动力, 来自于电机的扭力, 带动轮子转动, 而为了进行运动动力学建模, 引入虚拟力 F_A , 即假设虚拟力 F_A 作用于机器人上的某个点, 它是机器人的唯一驱动力, 机器人在其作用下改变运动状态。 F_A 是一个假想的力, 它是虚拟的, 在现实中并不存在。首先利用其进行运动动力学建模, 得出运动方程, 用以求出机器人在某个时间点需要的角速度和线速度; 然后, 再通过机器人的几何构型和实际运动关系, 求出所需的轮子转速, 从而将机器人所需的运动状态改变转化为现实中可实现的实际控制。

图 3.1 为武术擂台机器人的运动动力学模型。其中, W 坐标系为全局坐标系, R 坐标系为机器人坐标系; G 为机器人重心, C 为两轮中心点, F_A 为虚拟力合力, A 为虚拟力作用点, v 为 R 坐标系中 x 轴方向的线速度, ω 为机器人角速度; r 为机器人轮子半径, V_L 为机器人左轮线速度, V_R 为机器人右轮线速度, d 为两轮中心点到轮子的距离, h 为机器人重心 G 到虚拟力作用点 A 的距离, s 为机器人重心 G 到两轮中心点 C 的距离; θ 为虚拟力 F_A 与 R 坐标系中 x 轴的夹角, ϕ 为 W 坐标系与 R 坐标系间 x 轴的夹角。

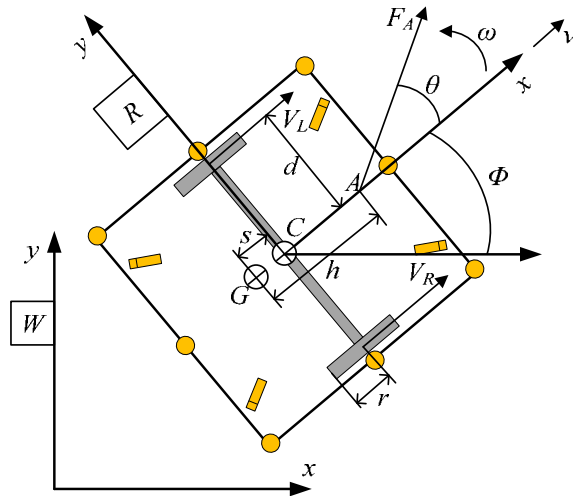


图 3.1 武术擂台机器人运动动力学模型

设机器人在虚拟力 F_A 的作用下移动。应用动力学方程

$$\begin{cases} \sum F = ma \\ \sum M = I_G \dot{\Omega} \end{cases} \quad (3.1)$$

可以得到：

$$\begin{cases} (I_{zz} + ms^2) \dot{\omega} - 2msv\omega + \frac{2bd^2}{r} \omega = F(h-s) \sin \theta \\ m\dot{v} + ms\omega^2 + \frac{2b}{r} v = F \cos \theta \end{cases} \quad (3.2)$$

式子中的参数有： F_A 的模为 F ，机器人的质量为 m ，围绕垂直轴的转动惯量为 I_{zz} ，粘性摩擦系数为 b 。设 s 为零或者足够小，令 $k_i = m/I_{zz}$ ，可将式 (3.2) 化简得线性微分方程：

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{I}{mr} (-2bv) + \frac{I}{m} F \cos \theta \\ \dot{\omega} = \frac{d^2}{mr} (-2bk_i \omega) + \frac{I}{m} Fk_i h \sin \theta \end{cases} \quad (3.3)$$

令 $x = (v, \omega)^T$, $u = (F \cos \theta, F \sin \theta)^T$ ，可以得到状态空间方程 $\dot{x} = Ax + Bu$ ：

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -2b/mr & 0 \\ 0 & -2bd^2/rI_{zz} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 1/m & 0 \\ 0 & h/I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \cos \theta \\ F \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

这个状态空间方程给出了机器人在虚拟力 F_A 作用下的运动情况。

3.1.2 坐标系转换

由于本文的模型没有采用地图构建，只通过传感器采集的信息来指导机器人运动，所以无法得知某一具体时刻机器人在全局坐标系中的实时位置和状态（如机器人运动到某一位置或某个时间点时，虚拟力 F_A 与 R 坐标系中 x 轴的夹角 θ ），而位置信息的缺失，会导致计算式（3.3）时参数不全，无法完成微分方程的求解。因此，在进行实际的运动方程计算时，需要进一步对图 3.1 中的模型进行改进。

机器人在任意一段时间内的运动，都是由许多微小时间点的运动累积而成的，用微积分的思想来说就是前者是后者的积分。因此，可以把一段连续的路径分割成许多微小的单元，而各单元的划分以机器人转动行为为边界，然后通过独立分析计算每段微小单元内机器人的运动，再对每段微小单元进行累加即可得到某一段时间内机器人的运动情况。由于每段微小单元都有一个初始状态，不需要知道机器人在某一时刻的绝对位置信息，而只需要知道其相对于微小单元初始状态的相对位置信息即可。为了实现这种分割和计算，要在每段微小单元开始时，进行坐标系转换，从而完成模型改进。

坐标系转换的具体思想是：在机器人运动过程中，每当机器人需要发生转动行为时，以此时的机器人姿态重建全局坐标系，机器人在这个坐标系的基础上开始转动，直到转动行为结束。即，当机器人需要发生转动行为时，以此时机器人坐标系 R 当作新的全局坐标系 W ，如图 3.2 所示。

针对改进之后的机器人运动模型，当发生转动时， θ 、 α 、 Φ 三者之间的关系可表示为：

$$\theta = \alpha - \Phi \quad (3.5)$$

其中， α 为虚拟力 F_A 与坐标系 W 中 x 轴的夹角。令 $\omega = \dot{\Phi}$ ，则式（3.3）可转换为：

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{l}{mr}(-2bv) + \frac{l}{m}F \cos(\alpha - \Phi) \\ \ddot{\Phi} = \frac{d^2}{mr}(-2bk_i\dot{\Phi}) + \frac{l}{m}Fk_i h \sin(\alpha - \Phi) \end{cases} \quad (3.6)$$

这样，通过坐标系转换，得到了改进后运动方程（3.6）。

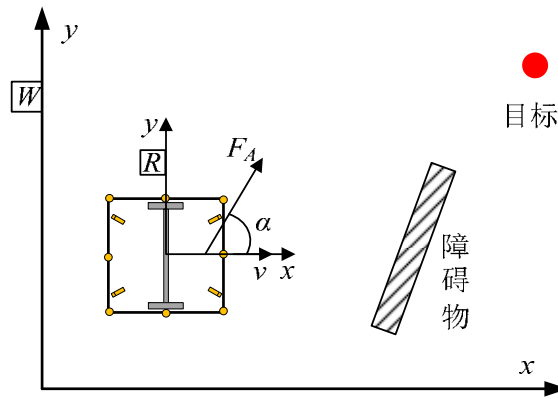


图 3.2 转动中的坐标系转换

机器人的运动最终是由电机带动轮子转动完成的，机器人的速度（ v, ω ）是由左右两个轮子的线速度 V_L 和 V_R 决定，因此，在求解出机器人的线速度 v 和角速度 ω 后，还需要进一步转化为其左右轮的实际速度。通过图 3.1 可知它们之间的关系为：

$$\begin{cases} v = \frac{V_L + V_R}{2} \\ \omega = \frac{V_R - V_L}{d} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_L = v - \frac{d\omega}{2} \\ V_R = v + \frac{d\omega}{2} \end{cases} \quad (3.7)$$

结合式（3.7）就可以将式（3.6）求解出的 v 和 ω 转化为机器人左右轮的实际速度。

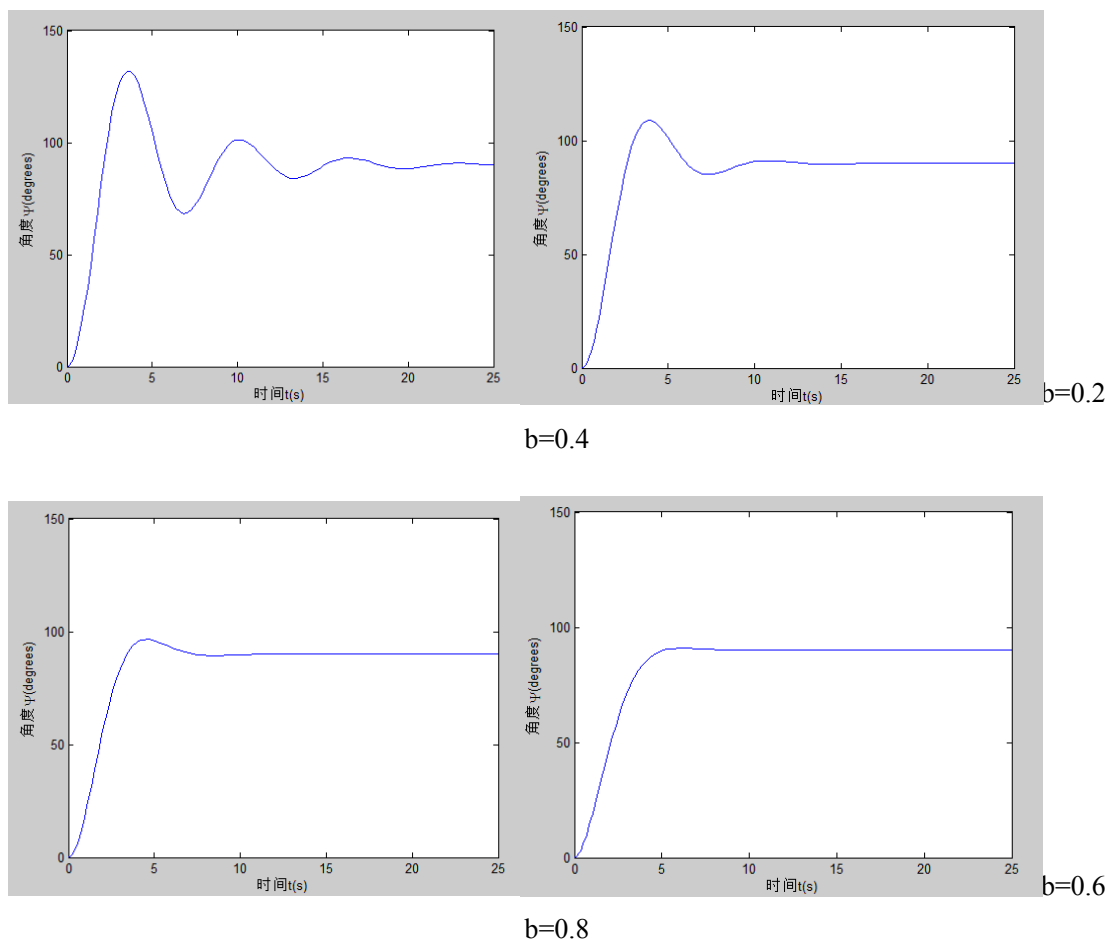
3.2 参数灵敏度分析

通过章节 3.1 的分析，我们知道，机器人的运动行为是由式（3.6）决定的。在这个运动方程中， m 、 r 、 d 为机器人的固有几何参数，为了方便分析，不妨先

进行标准化处理，设 $m=r=d=1$ ；此时运动方程的函数关系由 b 、 h 、 F 、 k_i 这 4 个变量决定，所以，用这 4 个参数来分析机器人运动行为的灵敏度。由于转动 90° 在机器人路径规划中是十分常见和具有代表性的行为，此处就以机器人转动 90° 为例来进行分析。

首先，分析粘性摩擦系数 b 。假设其他 3 个参数 h 、 F 、 k_i 均为 1，只有 b 为可变参数。图 3.3 给出了用 matlab 仿真时，不同 b 值下， ϕ 的瞬时响应。

从图 3.3 可以看到，当 b 较小时，曲线震荡的很厉害；随着 b 逐渐增大，曲线也随之变得逐渐平滑，且 b 越大，角度 ϕ 从 0 变动到 90 度所需的时间就越长。这个结论可以由直观分析得到：增大粘性摩擦系数 b 意味着增加了机器人运动过程中摩擦力损失的能量，这就使得系统更加稳定（根据相对稳定性），但运动也变化的更加缓慢。



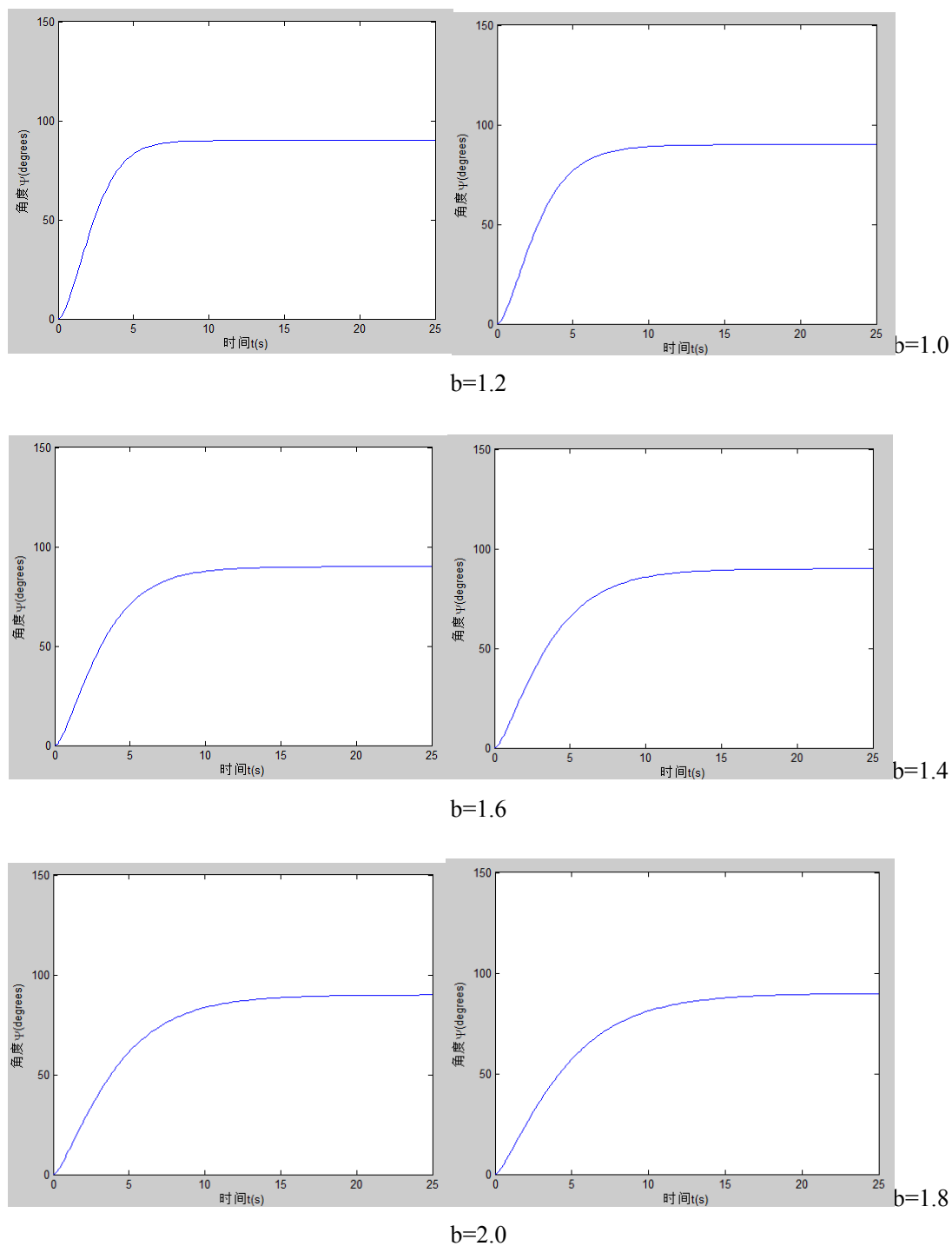


图 3.3 不同 b 值下 ϕ 的瞬时响应

章节 3.1 所述的运动模型中，每个参数都有明确的物理意义，因此，有时甚至可以只通过直观分析，就能得到每个参数对机器人运动行为的影响，来调整

参数。经过多次仿真和对比，我们可以得到，在保证机器人转弯曲线平滑的前提下，有较快响应速度的数值 $b \approx 0.975$ 。

同理，对其他 3 个参数的分析，也可以采用与 b 相同的分析和仿真方法，最终得到一组近似最佳值： $b=0.975$ ， $k_i=0.95$ ， $h=0.58$ ， $F=1.05$ 。

设机器人开始转弯的时间点为 $t=0$ ，则在近似最佳参数下整个转弯过程中，机器人的角速度 ω 和线速度 v 如图 3.4 所示。

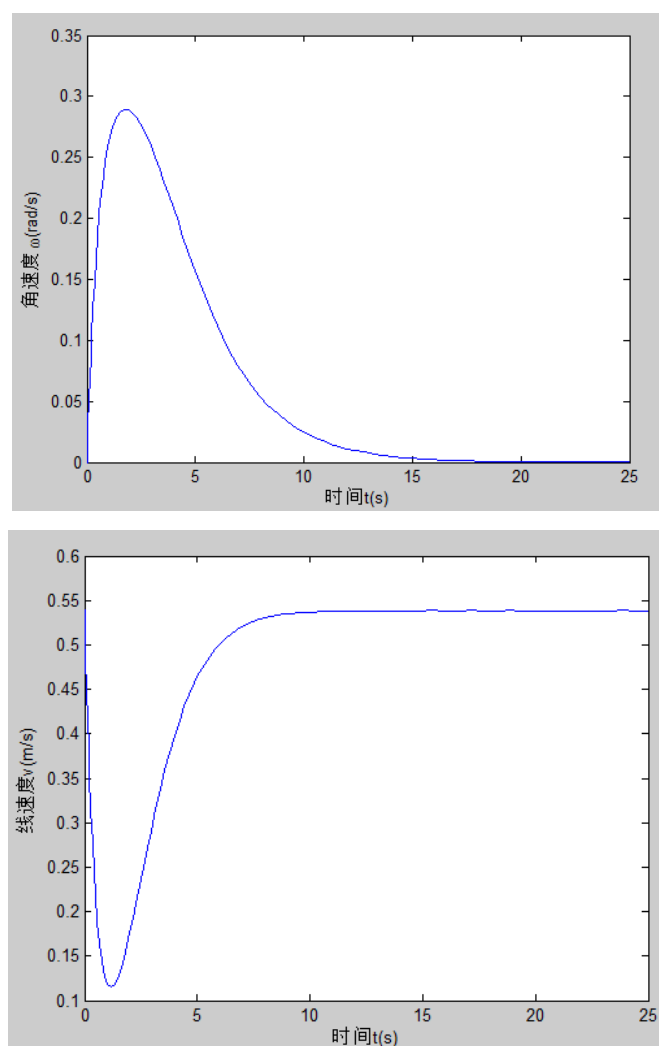


图 3.4 转弯时的机器人速度

从图 3.4 可以看出，“角速度-时间”曲线和“线速度-时间”曲线都很光滑，且最大角速度和最大线速度都不算很大，符合移动机器人的客观实际，具有物理可行性；最大线加速度为 $a_{max}=F/m=F=1.05\text{m/s}^2$ ，最大角加速度为

$\alpha_{max}=Fk_i h=0.58\text{rad/s}^2$ ，这两个值也都不算大，均在机器人的运动学和动力学限制范围内。

章节 3.1 中的模型，每个参数都有明确的物理意义，因此很多情况下，可以通过直观分析得出参数变化对机器人运动行为的影响，而不需要每次都进行复杂的数学运算来得出变化趋势。在实际环境中，机器人的尺寸参数已经确定，即转动惯量已经确定，且局部范围内（如机器人武术擂台）机器人的粘性摩擦系数也为定值，也就是说调节机器人运动行为的 4 个参数中的 b 和 k_i 已经确定，因此，需要通过调节 h 和 F 这 2 个参数，来得到想要的机器人运动行为。

接下来，通过直观分析的方法，给出如何通过调节 h 和 F ，使得机器人保持近似最佳参数下的转动行为（即 $w(t)$ 不变），而只改变机器人的线速度 v 。

设粘性摩擦力为 f ，由于机器人为差分驱动，有

$$f=2bv \quad (3.8)$$

又，机器人达到最大线速度时有 $F-f=0$ ，所以有

$$v_{max}=F/2b \quad (3.9)$$

在近似最佳参数下，由式（3.8）可得 $v_{max}=1.05/(2*0.975)=0.54\text{m/s}$ 。

如果想要得到一个不同的最大线速度 v_l ，则可令

$$F_l=Fv_l/v \quad (3.10)$$

观察式（3.6）可知，由于 b 和 k_i 均为定值，即 $b k_i$ 没变，因此只要保证 $F k_i h$ 不变，就可以保证微分方程组（3.6）中的第二个式子不变，即求解出的 $w(t)$ 不变，也就可以使机器人保持相同的转动行为。若想 $F k_i h$ 保持不变，结合式（3.10）可得

$$h_l=hv/v_l \quad (3.11)$$

这样，通过调节 h 和 F 这 2 个参数，就可以使机器人的转动行为不发生变化，而只改变其最大线速度。比如，想要在保持机器人转动行为不变的前提下，得到 $v_{max}=1\text{m/s}$ 根据上述分析可以得到 4 个参数变为 $b=0.975$ $k_i=0.95$ $h=0.31$ ， $F=1.95$ 。图 3.5 为在此参数下，机器人的角速度 ω 和线速度 v 的仿真图。

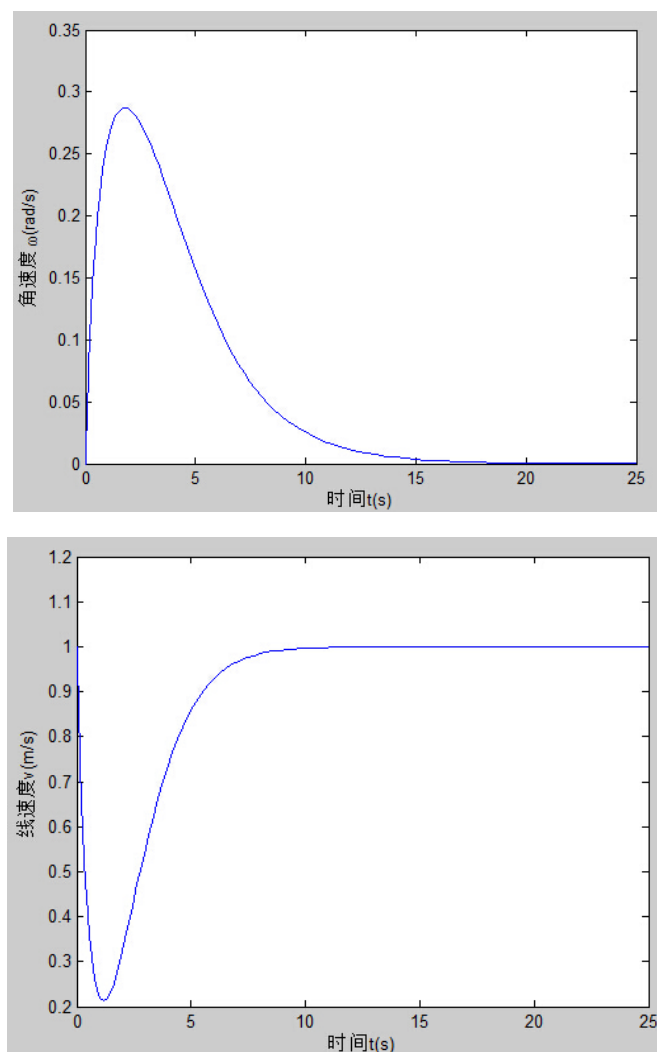


图 3.5 $v_{max}=1\text{m/s}$ 时的机器人速度曲线

从图 3.5 可以看出，转动过程中，机器人的“角速度-时间”曲线没有发生变化，而线速度最大值 v_{max} 变为 1m/s 。即，机器人保持了原有的转动行为，而只改变了线速度大小。

通过本节分析可知，正是由于运动方程组 (3.6) 中每个参数都有明确的物理意义，可以只通过直观分析就得出参数变化对机器人运动行为的影响，而不需要每次都进行复杂的数学运算。这种直观分析策略，在现场情况瞬息万变、需要选手快速制定出应对策略的机器人武术擂台赛现场，是十分必要的。章节 3.1 中的模型，既保证了武术擂台机器人路径规划和避障的科学性、准确性，又使得选手可以快速制定临场策略。

3.3 虚拟力建模

基于虚拟力的路径规划和避障，其核心思想是：机器人的运动，是在虚拟力 F_A 的作用下进行的。而虚拟力 F_A 作为一个假象的合力，又是由许多分力合并而成的。如图 3.6 所示，设 g 为机器人运动的目标点， o 为机器人运动过程中遇到的障碍物，目标点 g 对机器人的吸引力为 F_{gk} ，障碍物 o 对机器人的斥力为 F_{oi} 。若有多个目标点，就会有多个引力 F_{gk} ($k=1,2,3\dots$)；若有多个障碍物，就会有多个斥力 F_{oi} ($k=1,2,3\dots$)；运用物理学中力的分析方法进行力的合成，就可以得到最终的虚拟力 F_A 。这样，通过引力和斥力的共同作用，得到合力来引导机器人的运动，即

$$F_A = \sum F_{gk} + \sum F_{oi} \quad (3.12)$$

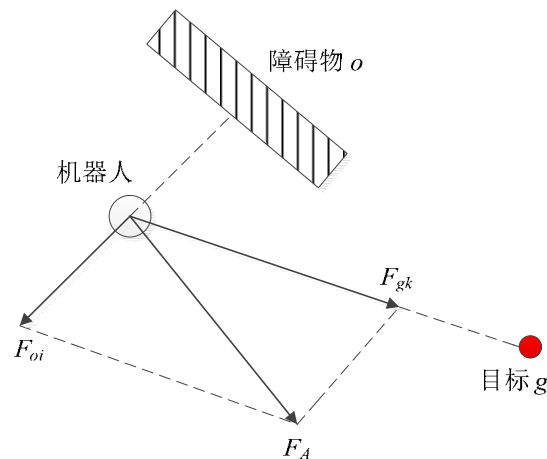


图 3.6 虚拟力模型

F_{gk} 和 F_{oi} 的大小可以借鉴万有引力模型

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (3.13)$$

万有引力模型中，物体间的引力大小与二者质量之积成正比，与二者间距离的平方成反比，万有引力常量 G 则用来调节引力大小。在虚拟力建模时，也可以采用类似地思路：目标点 g 对机器人的吸引力 F_{gk} 的大小和障碍物 o 对机器人的斥力 F_{oi} 的大小，均与其距离机器人的距离，及机器人自身半径大小相关。当目

标点和机器人，还有障碍物和机器人之间的距离发生变化时， F_{gk} 和 F_{oi} 也随之相应变化。

F_{gk} 可定义如下：

$$\begin{cases} F_{gk} = C, & l_{gk} > l_0 \\ F_{gk} = G_l \frac{d}{l_{gk}^{\sigma_l}}, & 0 < l_{gk} \leq l_0 \\ F_{gk} = 0, & l_{gk} = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

其中， l_{gk} 为目标点和机器人间的距离， l_0 为一个固定距离值； $\sigma_l < 0$ ， G_l 为可变的参数，用来调节不同机器人参数下 F_{gk} 的大小。当 $l_{gk} > l_0$ 时，由于目标点和机器人间的距离较远，目标点对机器人的吸引力为一常量 C ；当 $0 < l_{gk} \leq l_0$ 时，目标点距离机器人越远，则其对机器人的吸引力就越大；当 $l_{gk} = 0$ 时，即机器人到达目标点，此时吸引力变为0。这样，既保证了虚拟力 F_{gk} 随距离变化，又使得目标点与机器人之间距离过远时速度不会过大。

F_{oi} 可定义如下：

$$F_{oi} = G_2 \frac{d}{l_{oi}^{\sigma_2}}, \quad l_{oi} > 0 \quad (3.15)$$

其中， l_{oi} 为障碍物和机器人间的距离； $\sigma_2 > 0$ ， G_2 为可变参数，用来调节不同机器人参数下 F_{oi} 的大小。机器人越接近障碍物，则障碍物对机器人的斥力就越大，以确保机器人能成功避开障碍物。而分子上的 d ，是考虑到机器人的自身半径越大，则避障需要的最小距离就越大。

在实际环境中，以图 3.7 为例。移动机器人在向目标点运动的过程中，会遇到形状各异的障碍物，有些障碍物很小，单个传感器即可进行检测，机器人会受到一个沿传感器和机器人中心点连线方向的斥力 F_o ；而有些障碍物则较大，会同时被多个传感器检测到，如图 3.7 就是一个障碍物同时被 3 个传感器检测到，机器人会受到 3 个斥力，每个斥力的方向为各传感器和机器人中心点连线方向；还有些情况下，机器人在同一时间会收到多个障碍物斥力的作用，而每个障碍物又可能被多个传感器同时检测到，如此，情况就更为复杂。但无论是哪种情况，各 F_{gk} 和 F_{oi} 对机器人的作用力均可通过式（3.12）得到最终虚拟合力 F_A 。

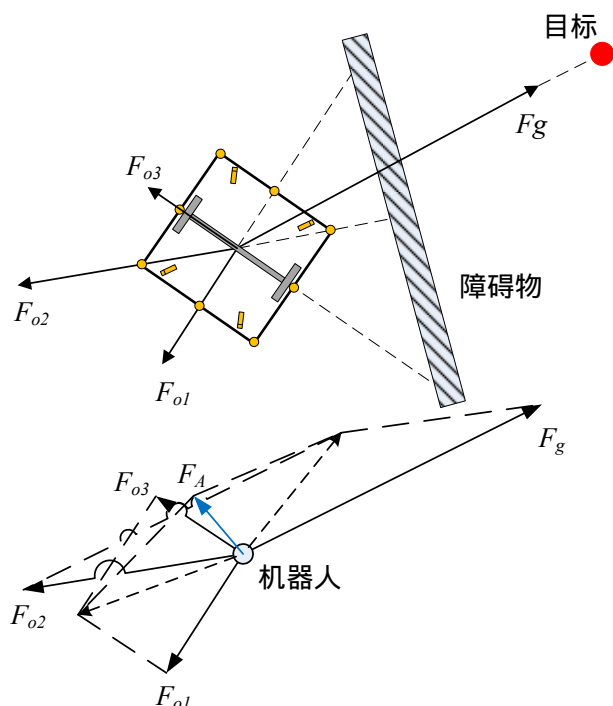


图 3.7 虚拟力合成示意图

当机器人在不同的位置和状态时，通过测距传感器对周围障碍物的检测，用上述方法可以得到实时的虚拟力 F_A 的大小和方向。在机器人运动过程中，将得到的虚拟力 F_A 带入式 (3.6)，就可以计算出机器人的线速度 v 和角速度 ω 。再把 v 和 ω 带入式 (3.7) 式，即可得到机器人的左右轮的线速度 V_L 和 V_R 。这样，机器人通过自身的传感器和中央处理模块，就可以动态实现路径规划和避障。

3.4 运动控制器构建

机器人的运动行为，是依据式 (3.6) 的求解结果制定的，首先讨论对该运动方程的求解问题。

式 (3.6) 是一个二元二阶微分方程组， v 和 ϕ 是方程组的 2 个未知数，即待求解量。 m 、 r 、 h 、 k_i 为机器人参数， b 为环境参数，他们在机器人和场地信息已提前确定好的机器人武术擂台赛中均为已知量；角度 α 为机器人即将发生转动行为时的初始状态量， F 则可以通过章节 3.3 中的虚拟力建模方法得到。这

样，2 个未知数，2 个方程，此方程组可解。而要想得到微分方程组的特解，还需要初始状态 $v_0(t)$ ， $\Phi_0(t)$ ， $\dot{\phi}_0(t)$ 。由于机器人的运动是连续的，因此 $t-1$ 时刻结束时机器人的运动状态，即为 t 时刻开始机器人的运动状态，所以有

$$\begin{cases} v_0(t) = v(t-1) \\ \phi_0(t) = \phi(t-1) \\ \dot{\phi}_0(t) = \omega_0(t) = \omega(t-1) = \dot{\phi}(t-1) \end{cases} \quad (3.16)$$

结合式 (3.16) 的初始状态，并把已知参数带入到式 (3.6)，即可求解出 t 时刻微分方程组的特解。

在机器人路径规划和避障中，希望机器人能对周围环境信息的变化迅速做出反应，若每次进行下一步规划时都要考虑一次复杂的规划算法，不利于理顺编程思路和制定运动策略。因此，希望把机器人的路径规划算法整理为一个整体模块——机器人运动控制器，采用“输入-机器人运动控制器-输出”的模型，来简化实际机器人路径规划时的步骤。以本章所述的机器人运动动力学和虚拟力建模方法为核心，来构建机器人的运动控制器，控制器模型如图 3.8 所示。

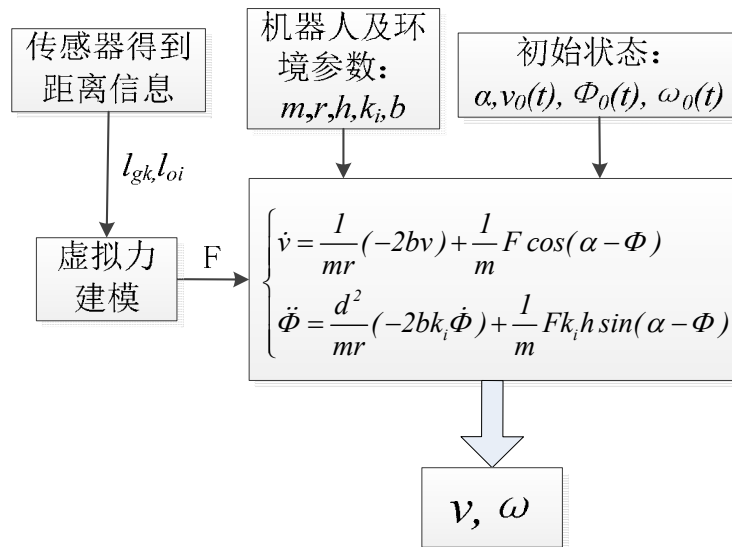


图 3.8 机器人运动控制器模型

如图所示，传感器探测周围环境并获取障碍物和目标点的距离信息，得到 l_{gk} 和 l_{oi} ；然后，通过章节 3.3 中的虚拟力建模方法计算出 F_{gk} 和 F_{oi} ，并运用力的合成最终得到 F_A ，其大小即为 F ，方向可以用来得到角度 α ；接着，再把机器人

及环境参数 m, r, h, k_i, b 带入式 (3.6), 并结合初始状态 $\alpha, v_0(t), \Phi_0(t), \omega_0(t)$ 即可求解出机器人的线速度 v 和角速度 ω 。

机器人运动控制器作为一个整体模块, 输入为传感器检测到的环境信息, 输出为机器人的速度信息 (v, ω)。在实际机器人应用中, 只需要通过传感器设法得到距离信息, 并把其作为输入运用到运动控制器这个模块中, 就能自动得出需要的速度信息, 来指导机器人运动。

3.5 本章小结

本章首先给出了武术擂台机器人的运动动力学模型, 并以此进行运动动力学建模。接着, 进行参数灵敏度分析, 用直观分析的方法阐述了参数对机器人运动行为的影响。然后, 参考万有引力模型, 进行了虚拟力建模。最后, 综合本章所述的模型构建了机器人运动控制器。

4 武术擂台机器人攻防控制策略

机器人武术擂台赛中，决定机器人对抗强度和比赛效果的因素有很多，机器人结构和攻防控制策略是其中最重要的两点。由于比赛规则中对机器人的尺寸、形状等有具体规定，机器人结构能进行的调整比较有限，因此，制定一个有效的攻防控制策略成为了机器人武术擂台赛的重中之重。本章运用第 3 章的运动动力学建模、虚拟力建模及构建的运动控制器，来制定基于运动动力学的武术擂台机器人攻防控制策略。

4.1 整体对抗策略

武术擂台机器人在进行对抗时，其攻防控制策略主要从以下几个方面考虑：避免掉台，防守策略，进攻策略。

避免掉台是武术擂台机器人对抗过程中需要最优先考虑的因素，只有先保证自己不掉到台下，才能避免对方得分；也只有机器人处于擂台之上时，进攻和防守等一系列策略才有意义。防掉台策略方面，认同度较高的是通过红外光电开关传感器检测擂台边缘，来防止机器人掉台，这是一种简洁且有效的方法，本文在防掉台方面也采用这种方法。

武术擂台机器人对抗过程中防守策略的核心问题之一是躲避敌人的进攻。当敌方机器人朝己方机器人撞来时，如果被撞到侧面或后背，由于几何构型和动力等因素，己方机器人将处于十分被动的局面，极有可能被对方一路推到台下；即使是正面和敌方机器人相撞，由于双方机器人处于正面全力对抗状态，有很大可能性会出现互相僵持的局面，这种情况下对抗结果受双方机器人构型和电机动力等硬件的影响较大，且运气成分也在很大程度上左右着结果。由此可见，及时避开敌方机器人朝己方机器人的冲撞，是十分必要的，这也是机器人进行进攻行为的前提。传统的武术擂台机器人防守策略，大多采用原地旋转或者朝侧方 45° 行进的办法来躲避敌方机器人对己方机器人的冲撞，然而这种方法是一种被动的应激行为，计划性差，防守效果欠佳，且不能和己方机器人的进攻行为进行很好的融合，不利于整体对抗方案的实施。

武术擂台赛中，只有将敌方机器人推倒或者推到台下才能得分，进攻的重

要性不言而喻。防守策略中我们要尽量避免被敌方机器人撞到己方机器人的侧面或后背，因为这是武术擂台机器人的薄弱部分，相对的，机器人的进攻策略则是要尽量攻击对方的侧面或后背。传统的武术擂台机器人进攻策略，是通过传感器找到敌方机器人之后，就全力撞向对方，不考虑碰撞部位，因此，有可能出现双方机器人正面相撞，对抗相持不下的局面；此外，由于每次检测到敌方机器人时，敌方机器人和己方机器人之间的距离，及双方机器人之间的相对角度和位置不尽相同，如果每种情况下都使用“全速撞过去”这一策略，则会缺乏针对性和准确性，不能使进攻效果达到较为理想的状态。

为弥补武术擂台机器人现有攻防控制策略的不足，提高攻防控制的科学性、有效性、稳定性，结合前面章节中给出的运动动力学和虚拟力建模，对其攻防控制策略进行改进。武术擂台机器人整体攻防控制策略的流程图如图 4.1 所示。对抗开始后，机器人在擂台上进行随机游走寻敌。一旦发现敌人，首先调整己方机器人姿态为面朝敌人，然后执行由防守策略和进攻策略组成的攻防一体的核心攻防策略，在到达假想目标点后，最大速度推敌方机器人下台。整个对抗过程中，通过中断进行实时边缘检测，防止机器人掉台。

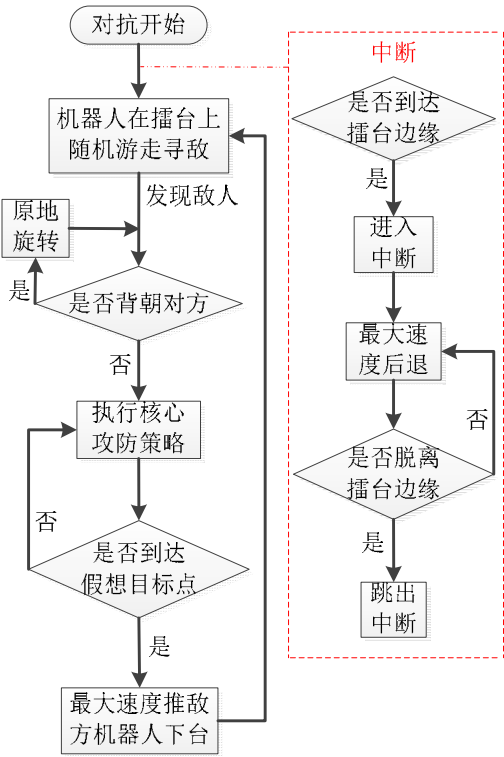


图 4.1 攻防控制策略的流程图

4.2 机器人姿态调整

4.2.1 边缘检测

由于不掉台是机器人的首要任务，因此检测擂台边缘的优先级在所有动作中是最高的。边缘检测通过装在机器人上的四个红外光电开关传感器实现，由于擂台和地面有 150mm 的高度差，当机器人到达擂台边缘时，红外光电开关传感器检测到的距离值将发生变化，从而影响开关状态。当武术擂台机器人在擂台上正常运动时，用于边缘检测的四个红外光电开关传感器始终检测到前方有障碍物（擂台台面），其返回电平值是 1；当机器人到达擂台边缘时，一个或多个红外光电开关传感器前方的障碍物消失（地面和红外光电开关传感器之间的距离超出了其检测距离），返回电平值变为 0。通过分析红外光电开关传感器返回值的变化，就可以知道机器人的哪一侧到达了擂台边缘。

为了防止掉台，当机器人检测到擂台边缘后，给予机器人一个朝向擂台边缘反方向的虚拟力 F_{max} ，对应于此虚拟力的机器人速度 v_{max} 为其能达到的最大速度，以保证机器人在最短时间内脱离擂台边缘这个危险区域，如图 4.2 所示。

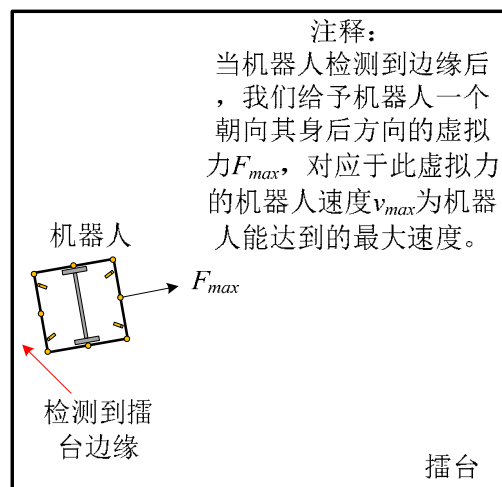


图 4.2 边缘检测防掉台

4.2.2 朝向调整

受武术擂台机器人结构、重心、形状等影响，机器人的后背和侧面是其薄弱部分。因此在整个对抗过程中，希望机器人始终以正面面对敌人，并尽量攻击敌人的侧面和后背。所以，当己方机器人后背或侧面带的传感器检测到敌方

机器人时，机器人马上以最快速度进行原地旋转，直到调整为正面面对敌人，这样，既有利于防止敌方机器人对己方机器人侧面或后背的进攻，又为接下来的核心攻防策略创造了有利条件。这种应激性的即时反应策略，能在最短时间内把机器人姿态调整为对己方有利的状态，有时候在摆脱敌方机器人对己方机器人进攻时有奇效，也能在最短时间内把机器人姿态调整为适合进行核心攻防策略的状态。

4.3 防守策略

4.3.1 机器人动态路径规划和避障

在实际的机器人对抗中，由于双方机器人都处于运动状态，因此在机器人进行路径规划和避障时，往往障碍物也是运动的，机器人处于一个动态的过程中，机器人要在一个时刻变化的外部环境中完成避障规划。要实现机器人的动态路径规划和避障，不仅需要考虑某个时间点己方机器人自身的状态，还需要考虑敌方机器人的运动状态对己方的影响。

机器人的运动行为，是依据式 (3.6) 的求解结果制定的。在章节 3.4 中，我们讨论了该方程的求解方法，初始状态 $v_0(t)$, $\Phi_0(t)$, $\dot{\phi}_0(t)$ 是求解该方程的关键因素，机器人动态路径规划和避障也不例外。在机器人动态路径规划和避障中，机器人的运动动力学分析没有发生变化，运动行为依然由式 (3.6) 决定；不同之处在于，用于方程求解的初始状态，不能只考虑己方机器人自身的运动学状态，还要考虑敌方机器人此时的状态，来决定求解运动方程时的初始条件。确定机器人动态路径规划和避障时初始条件的核心思想是：在计算 t 时刻的虚拟力时，以敌方机器人为参照物，即假设敌方机器人不动，将其速度反作用于己方机器人来进行分析。

如图 4.3 所示，敌方机器人在 t 时刻以速度 v_e 朝我方机器人运动。以敌方机器人为参照物，则相当于有一个大小为 v_e ，方向和 v_e 相反的速度 $v_e(t-1)$ 作用于我方机器人。对该速度进行分解，可得两个分速度 $v_{ex}(t-1)$ 和 $v_{ey}(t-1)$ 。在此情况下， t 时刻我方机器人的初始线速度 $v_0(t)$ 由 $t-1$ 时刻的线速度 $v(t-1)$ 和 $v_{ex}(t-1)$ 共同作用构成，初始角速度 $\omega_0(t)$ 由转 $t-1$ 时刻的角速度 $\omega(t-1)$ 和 $v_{ey}(t-1)$ 换成的角速度共同作用构成。则计算 t 时刻的虚拟力时，式 (3.16) 中的初始条件变为：

$$\begin{cases} v_0(t) = v(t-l) + v_{e_x}(t-l) \\ \phi_0(t) = \phi(t-l) \\ \dot{\phi}_0(t) = \omega_0(t) = \omega(t-l) - v_{e_y}(t-l)/d = \dot{\phi}(t-l) - v_{e_y}(t-l)/d \end{cases} \quad (4.1)$$

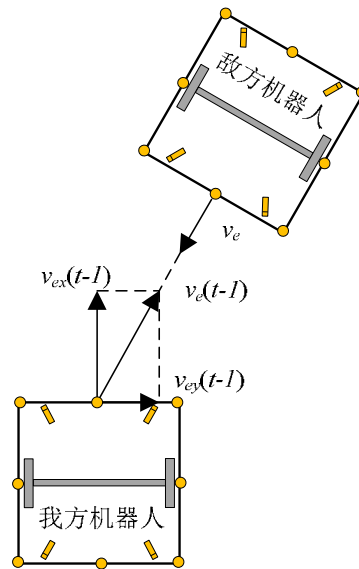


图 4.3 机器人相对运动速度转换示意图

这样，以 (4.1) 式为初始条件，带入到式 (3.6) 中求出的虚拟力 F_A 考虑了敌方机器人的运动状况，因此在其作用下可以实现机器人的动态路径规划和避障，以应用于机器人的核心攻防策略。

4.3.2 具有攻击目的的防守策略

机器人的防守策略，是躲避敌方机器人的正面碰撞，防止敌方把自己推倒或推下擂台；机器人的进攻策略，是尽量绕到对方的侧面或者后方，然后将敌方机器人推倒或者推下擂台。二者有很大的相似性，因此，我们设计了一种具有攻击目的的防守策略。

在机器人武术擂台赛比赛过程中，双方机器人的相对位置不断发生变化，通过安装在己方机器人上的红外测距传感器，可以实时检测到己方机器人距离敌方机器人的距离；接着，运用第 3.3 章节的虚拟力建模方法，就可以得到敌方机器人对我方机器人的斥力 F_{oi} ，而要得到最终作用于机器人的虚拟力 F_A ，关键

是得到目标点对机器人的吸引力 F_g 。

普通的导航和路径规划中，有一个固定或比较明确的目标点，机器人的最终任务是到达这个目标点，因此目标点对机器人的吸引力是比较好确定的，只需按照式 (3.14) 计算即可得到。而机器人武术擂台赛中，双方机器人的核心任务是互相对抗，而不是到达某个确定的点，不能简单地按照章节 3.3 的模型来得到目标点对机器人的吸引力。因此，若想得到最终的虚拟力 F_A 来指导机器人运动，首先需要确定一个己方机器人运动的假想目标点。

假想目标点的确定采用以下思路：在双方机器人接近的过程中，我们希望己方机器人绕到对方的侧面或后方，而不是正面相撞，因此假想目标点在敌方侧面或后方。针对于此，图 4.4 给出了两种极限情况下的机器人相对位置示意图，左图为双方机器人面对面，右图为我方机器人面对敌方机器人的底盘对角线处。

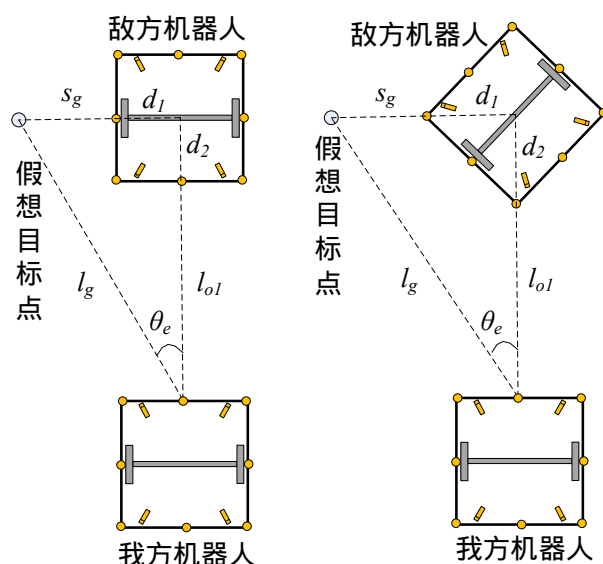


图 4.4 假想目标点下机器人相对位置示意图

假设目标点偏离敌方机器人中心点的距离为 l_e ，敌方机器人中心点到其底盘边缘的距离为 d_1 （边缘点由机器人中心点到假想目标点的连线确定），己方机器人测距检测点到敌方机器人的最近距离为 l_{ol} ，敌方机器人中心点到其底盘边缘的距离为 d_2 （边缘点由机器人中心点到我方机器人测距检测点的连线确定），假想目标点和我方机器人间的距离与方向角分别为 l_g 、 θ_e ，则它们的几何关系可表示为：

$$\begin{cases} l_e = d_1 + s_g & d < d_1 < \sqrt{2}d \\ l_g = \sqrt{l_e^2 + (l_{o1} + d_2)^2} & d < d_2 < \sqrt{2}d \\ \theta_e = \arcsin(l_e / l_g) \end{cases} \quad (4.2)$$

其中, s_g 为偏移距离修正量, 用来修正不同机器人和对敌策略情况下的偏移距离。由于 d_1 和 d_2 的值需要根据机器人不同的相对位置确定, 为了保证公式的通用性和机器人实际应用的可行性, 在制定对敌策略时, 将 d_1 和 d_2 的值设定为常数。这样, 得到 l_g 和 θ_e 后, 就可以通过式 (3.14) 得到目标点对机器人的吸引力 F_g , 进而通过式 (3.12) 得到最终的虚拟力 F_A 。

机器人防守策略中, 己方机器人在躲避敌方机器人冲撞时并不是无目的进行闪躲, 而是朝一个有利于己方机器人执行下一步策略的地点进行闪躲, 在躲避的同时逐渐运动到假想目标点, 为接下来的攻击策略做准备。这种防守策略带有攻击目的, 在虚拟力 F_A 作用下, 己方机器人既躲避了敌方机器人的攻击, 又能绕到对方侧面或后方准备对其实施攻击, 因此实现了攻防一体。

4.4 攻击策略

机器人的攻击策略, 是基于其防守策略继续进行的, 在防守策略执行时, 攻击策略的准备阶段其实已经完成。机器人执行防守策略时, 要到达的假想目标点是机器人的侧面或后方; 而执行进攻策略时, 目标点也随之变换, 进攻目标点为敌方机器人的中心点。此时, 机器人的受力图如图 4.5 所示。

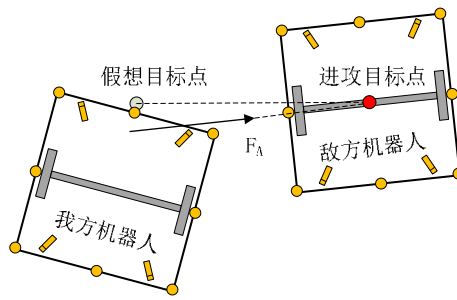


图 4.5 到达假想目标点后的机器人受力分析示意图

在到达假想目标点后, 机器人的目的是全力推倒对方或推对方下台, 因此

敌方机器人不再被视作“障碍物”，我方机器人不再受到其斥力的作用，而是视其为进攻对象，因此进攻目标点也就选为敌方机器人的中心点。此时，己方机器人只受一个力，即进攻目标点对我方机器人的吸引力 $F_A = F_g = F_{max}$ （此虚拟力对应于机器人能达到的最大速度 v_{max} ）。

若进攻策略执行顺利，敌方机器人被推到台下后，我方机器人将继续随机游走寻敌，准备进入下一个攻防周期；若在执行进攻策略的过程中，敌方机器人成功摆脱，则我方机器人根据传感器检测到的信息决定下一步的动作，执行随机游走寻敌、防守策略、攻击策略等。

4.5 本章小结

本章首先阐述了传统武术擂台机器人在机器人武术擂台赛中的攻防策略，并以此引出武术擂台机器人整体对抗策略。接着，分别对机器人边缘检测和朝向调整、防守策略、攻击策略进行了详细分析，构建出一套基于运动动力学的攻防一体的攻防对抗方案。

5 实验结果与分析

为了验证本文模型的正确性和实用性，本章分别进行四个实验。前两个实验，运用 matlab 对运动方程和虚拟力建模进行仿真，模拟武术擂台机器人转动行为轨迹和机器人虚拟力大小曲线，验证机器人运动动力学建模和虚拟力建模的正确性。第三个实验，把运动动力学和虚拟力建模运用于武术擂台机器人上，进行机器人避障实验，验证其避障效果。第四个实验，采用本文提出的攻防控制策略，运用于武术擂台机器人上，进行实际的机器人对抗实验，验证攻防控制策略的可行性和对抗强度。

本章实验中，武术擂台机器人的实际几何参数为： $m=3.8\text{kg}$ ， $r=0.0325\text{m}$ ， $d=0.12\text{m}$ 。在进行实际机器人实验时，运动方程和虚拟力中的其他参数取： $b=0.975$ ， $k_i=138.89$ ， $h=0.1$ ； $l_0=1$ ， $C=48$ ， $G_I=400$ ， $\sigma_I=-2$ ， $G_2=10$ ， $\sigma_2=1.2$ ； $s_g=\sqrt{2}d=0.17\text{m}$ ， $d_1=d_2=\sqrt{2}d=0.17\text{m}$ 。

5.1 转动 90° 仿真实验

90°的转动，在机器人路径规划任务中是非常常见和具有代表性的。因此，为了验证本文中运动动力学建模的正确性，用 matlab 对机器人在连续运动情况下转动 90°的轨迹进行仿真。

武术擂台机器人的大体规格虽已在武术擂台赛的比赛规则中有相关规定，但机器人参数还是各自存在差异，因此进行 matlab 仿真实验来验证运动动力学建模时，不使用本章开头所述的机器人实际几何参数，而是对参数采用标准化处理，既可以验证模型的通用性，又可以简化计算。机器人几何参数标准化之后，我们通过改变 b ， k_i ， h ， F 这 4 个关键参数来仿真机器人的移动轨迹。

首先对参数进行标准化，设 $m=r=d=1$ ；然后，通过稳定性条件^[54]和章节 3.2 的参数灵敏度分析，我们可以得到式 (3.6) 的一组近似最佳参数为： $b=0.975$ ， $k_i=0.95$ ， $h=0.58$ ， $F=1.05$ 。运用这组参数，当机器人在连续运动情况下遇到障碍物直接转动 90°的移动轨迹如图 5.1 所示。

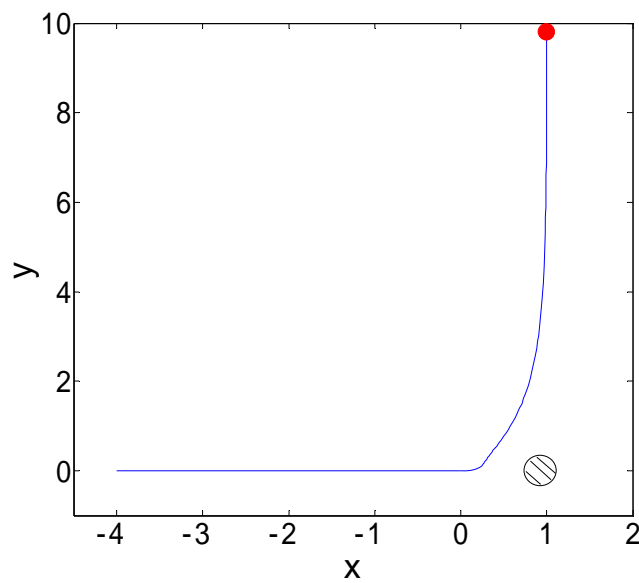
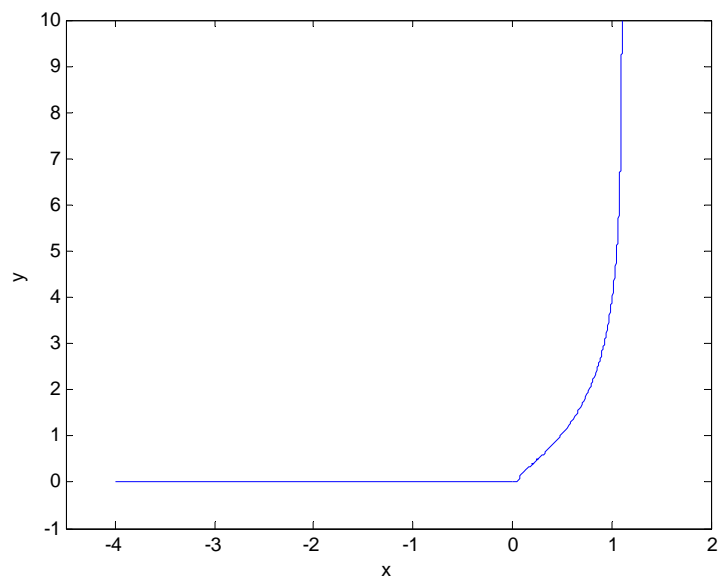
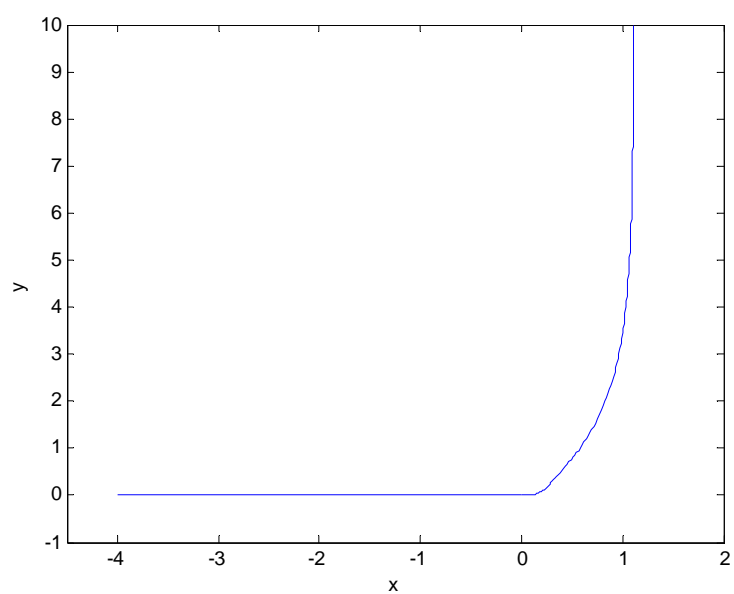


图 5.1 近似最佳参数下机器人转动 90° 的移动轨迹

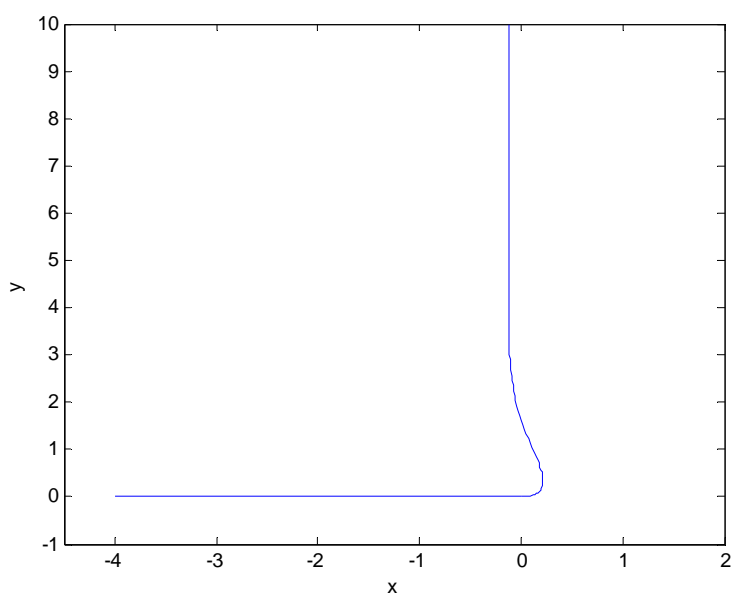
可以看到，机器人在使用最佳参数时，连续运动情况下转动 90° 的移动轨迹比较平滑，并且较好地完成了路径规划任务。图 5.2 为其他几组参数下，机器人转动 90° 的移动轨迹图。



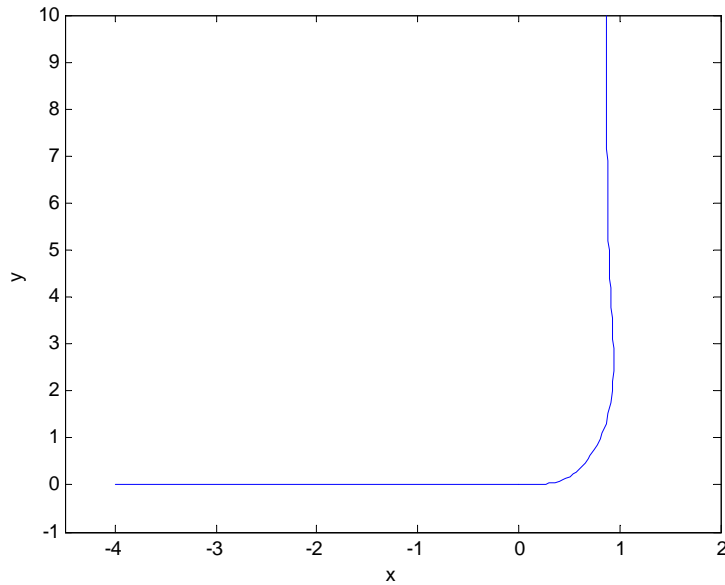
(a) $b=2$, $k_t=0.95$, $h=0.58$, $F=1.05$



(b) $b=0.975$, $k_i=2$, $h=0.58$, $F=1.05$



(c) $b=0.975$, $k_i=0.95$, $h=1$, $F=1.05$



(d) $b=0.975, k_i=0.95, h=0.58, F=2.5$

图 5.2 其他几组参数下机器人转动 90° 的移动轨迹

图 5.2 中，保持 b, k_i, h, F 这 4 个参数中的 3 个不变，只改变其中 1 个，可依次得到 4 幅机器人转动 90° 的移动轨图。可以看到，4 幅图中机器人的运动轨迹各不相同，且均和近似最佳参数下的机器人移动轨迹图有所不同：有的转动急促，轨迹不够平滑；有的转动缓慢，反应不够灵敏；有的甚至震荡的很厉害，运动轨迹十分奇怪。但无论何种参数，无论轨迹表现是否优秀，机器人都能完成“转动 90° ”这一路径规划任务，并最终到达目标点。可见，本文所述的运动动力学模型具有稳定性和正确性。

5.2 虚拟力仿真实验

把实验中用到的实际数据： $d=0.12, l_0=1, C=48, G_l=400, \sigma_l=-2, G_2=10, \sigma_2=1.2$ ，带入到式 (3.14) 和 (3.15) 可得

$$\begin{cases} F_{g_k} = 48, & l_{g_k} > 1 \\ F_{g_k} = 400 \frac{0.12}{l_{g_k}^{-2}}, & 0 < l_{g_k} \leq l_0 \\ F_{g_k} = 0, & l_{g_k} = 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

$$F_{o_i} = 10 \frac{0.12}{l_{o_i}^{1.2}}, \quad l_{o_i} > 0 \quad (5.2)$$

在 matlab 中对虚拟力 F_g 和 F_o 进行仿真，可以得到图 5.3。

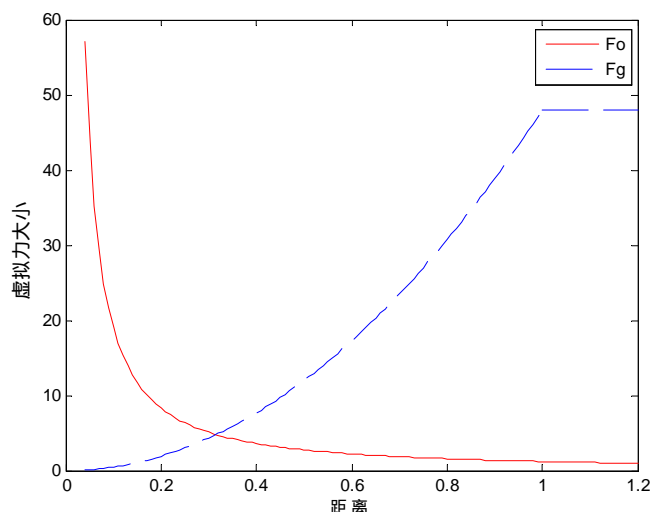


图 5.3 “虚拟力大小-距离”图

如图 5.3 所示，目标点对机器人的吸引力 F_g 随着二者间距离增大逐渐增大，当距离超过 1m 后， F_g 不再增加，保持 48N 不变；障碍物对机器人的斥力 F_o 随着二者间的距离逐渐增大而减小。这一仿真结果符合章节 3.3 的分析，验证了虚拟力建模的正确性。

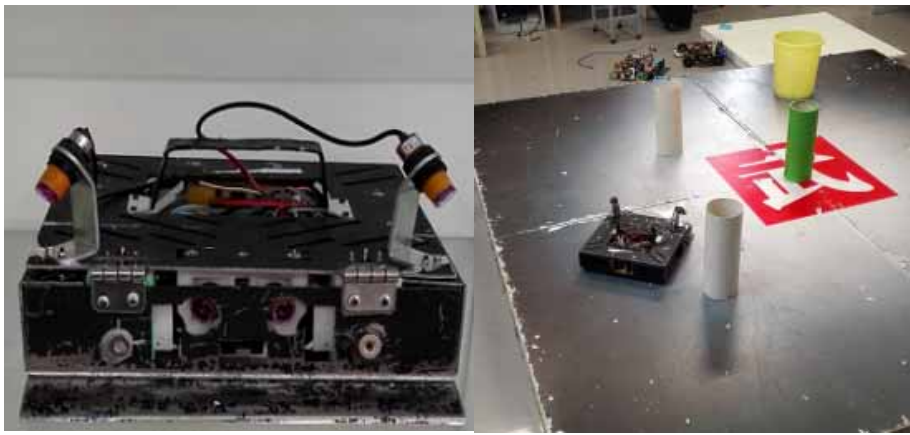
5.3 机器人避障实验

本实验中，我们在武术擂台上摆放若干障碍物，规定好起始点和终点，使用实际的武术擂台机器人在擂台上运动，验证其是否能在从起始点到达终点的行进过程中，避开障碍物，完成路径规划。

图 5.4 (a) 为武术擂台机器人实物图，图 5.4 (b) 为试验场景，我们用武术擂台机器人在设置好的试验场景中对本文所述避障模型进行实际验证。实验中机器人的实际移动轨迹如图 5.4 (c) 所示。通过实验可以看到，机器人的真实表现比较优秀，和仿真结果较为接近，但轨迹没有仿真环境下理想。导致这种情

况的主要原因，有以下几方面：

- (1) 实际环境中，轮子和地板的粘性摩擦系数 b 并不是理想值；
- (2) 传感器的检测值，及数据传输过程中都存在数值波动；
- (3) 从传感器检测，到中央处理模块给电机驱动模块发送指令，整个过程中有运算和通信延迟；
- (4) 电机对轮子速度的控制，以及机器人的整个运动结构并不能像仿真那样精确。



(a) 武术擂台机器人 (b) 实验场景



(c) 移动轨迹

图 5.4 机器人避障实验

虽然机器人的实际避障实验和仿真相比存在瑕疵，但整体表现优秀，很好地完成了路径规划和避障任务，验证了运动动力学建模和虚拟力建模运用于机器人路径规划和避障的可行性、实用性。

5.4 机器人对抗实验

章节 5.1~5.3 的实验，已经验证了本文所述的运动动力学建模和虚拟力建模运用于机器人运动控制的可行性。我们若想将其最终应用于武术擂台机器人上，还要结合第 4 章的攻防控制策略，对武术擂台机器人的攻防强度进行验证。机器人对抗实验场景如图 5.5 所示。

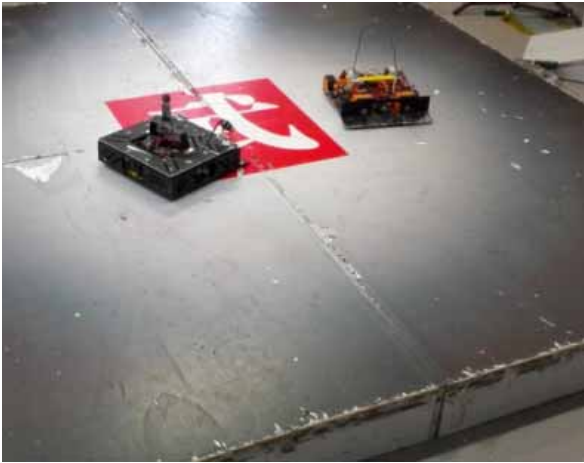


图 5.5 机器人对抗实验场景

本实验中，采用两台机器人进行实际对抗的方法，来验证本文所述攻防控制模型的实用性。将两台机器人分别编号 A 和 B，其中，A 采用传统的对抗策略，B 采用本文提出的模型。经过 2 分钟的实际对抗，它们的表现如表 5.1 所示。

表 5.1 攻防表现统计

机器人编号	A	B
成功躲闪次数	4	8
成功绕到对方侧面或后方次数	2	5
掉台次数	3	1

从该表可以看出，B 机器人躲闪成功次数和绕到对方薄弱部位的次数更多，掉台次数更少，表现明显优于 A。可见，以运动动力学和虚拟力建模构建的运动控制器为基础的武术擂台机器人攻防控制建模，增强了擂台机器人的对抗能力。

5.5 本章小结

本章依次进行了四个实验：转动 90° 仿真实验，虚拟力仿真实验，机器人避障实验，机器人对抗实验。第一个和第二个实验通过仿真，验证运动动力学和虚拟力建模的正确性；第三个实验把运动动力学建模和虚拟力建模应用于实际的机器人上，验证其路径规划和避障效果；第四个实验结合本文提出的攻防控制策略，进行实际机器人对抗，验证本文模型的实用性。

6 总结与展望

6.1 总结

随着社会和经济的不断发展,智能移动机器人被越来越广泛地应用到工业生产和日常生活当中。自主移动性研究是智能移动机器人研究的一个关键问题,机器人在移动过程中能否准确、快速地对周围环境做出反应,实时避开前进过程中的障碍物并且不间断的移动到目的地是非常重要的。针对机器人的自主移动性问题,现有的许多算法都在一定程度上提高了机器人路径规划和避障的成功率,但大多没有考虑机器人的运动动力学限制和几何参数,在实际机器人应用中会出现物理可行性和泛用性问题等。本文提出了一种基于虚拟力控制的运动动力学建模方法,结合传感器实现机器人避障规划,并最终应用于武术擂台机器人。

本文以武术擂台机器人为模型,介绍了其整体结构、电路系统和硬件组成。以差分驱动这类运动结构的机器人为例,提出了一种基于虚拟力的运动动力学建模方法,该模型包括运动动力学建模和虚拟力建模两大部分,运动动力学建模以机器人几何参数为基础推导出运动方程,虚拟力建模给出了一种距离影响虚拟力大小的建模方法。进行了参数灵敏度分析,并结合运动动力学建模和虚拟力建模,完成了机器人运动控制器构建。阐述了武术擂台机器人的对抗策略,并运用运动建模,制订出一套完整的机器人武术擂台赛对抗方案,提出了攻防一体的武术擂台机器人攻防控制策略。最终的实验结果验证了运动动力学建模、虚拟力建模和攻防控制策略的正确性及实用性,为机器人避障规划和武术擂台机器人对抗策略提供了一种新的思路。

6.2 展望

本文先进行了理论建模,然后把模型应用于实际机器人应用中。在理论和实际应用中,还存在许多不足和需要改进完善的方面:

(1)进一步降低武术擂台机器人的高度,可以使其重心更加稳定;采用精度更高的传感器可以提高避障规划质量;加入电子罗盘等设备的辅助,可以提高模型精度。

- (2) 还需通过大量试验，不断调整机器人本体的传感器位置和角度。
- (3) 优化编程算法，提高机器人避障规划的实时性。
- (4) 当前的武术擂台机器人攻防策略还需要通过不断的对抗实验，进行细节上的调整，从而不断完善方案，提高对抗强度。
- (5) 可以开发上位机软件，实时监控机器人所受虚拟力大小和方向等信息，方便机器人的调试和攻防策略的优化等。

参考文献

- [1] 美国机器人协会. 机器人[EB].
- [2] Garcia E, Jimenez M A, De Santos P G. The evolution of robotics research - from industrial robotics to eld and service robotics[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2007, 14(1): 90-103.
- [3] 谭民, 徐德, 侯增广等. 先进机器人控制[M]. 高等教育出版社, 2007.
- [4] 徐扬生. 智能机器人引领高新技术发展. 科学时报[N], 2010-08-12.
- [5] Stephan K D, Michael K, Michael M G. Social implications of technology: the past, the present, and the future[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100 (Special Centennial Issue): 1752-1781.
- [6] 黄永安, 熊蔡华, 熊有伦. 智能机器人与应用的现状与发展趋势[J]. 国际学术动态, 2009, 04: 38-39.
- [7] 蔡自兴, 贺汉根, 陈虹. 未知环境中移动机器人导航控制研究的若干问题[J]. 控制与决策, 2002, 04: 385-390+464.
- [8] 蔡自兴, 贺汉根, 陈虹. 未知环境中移动机器人导航控制理论与方法[M]. 科学出版社, 2009.
- [9] Amitava Chatterjee, Anjan Rakshit, NNirmal Singh. Vision Based Autonomous Robot Navigation: Algorithms and Implementations[M]. China Machine Press, 2014.
- [10] 李磊, 叶涛, 谭民, 陈细军. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人, 2002, 05: 475-480.
- [11] 凌巍炜. 静态场景中机器人避障规划问题的模型和算法研究[D]. 湖南大学, 2015.
- [12] 许晓龙. 基于局部环境信息的移动机器人动态避障研究[D]. 沈阳工业大学, 2015.
- [13] Arkin R C. Behavior-based Robotics[M]. The MIT Press, 1998.
- [14] 徐玉华, 张崇巍, 徐海琴. 基于激光测距仪的移动机器人避障新方法[J]. 机器人, 2010, 02: 179-183.
- [15] 徐跃. 基于超声波测距的机器人定位与避障[D]. 齐鲁工业大学, 2013.
- [16] 张树刚. 基于超声波的移动机器人局部避障算法及应用[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [17] 冯申坤, 朱世强, 龚华锋等. 智能吸尘机器人控制系统的设计[J]. 机电工程, 2004, 04: 4-7.
- [18] 陈绍茹, 陈奕梅. 基于多传感器信息融合的移动机器人避障[J]. 传感器与微系统, 2014, 05: 35-38.
- [19] 杨晶东, 蔡则苏, 杨敬辉. 一种有效的移动机器人行为融合避障方法[J]. 机械工程学报, 2012, 05: 10-14.
- [20] Rodriguez A, Mason M T. Path connectivity of the free space[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(5): 1177-1180.
- [21] Gu J J, Cao Q X. Path planning for mobile robot in a 2.5-dimensional grid-based map[J].

Industrial Robot, 2011, 38(3): 315-321.

- [22] 欧阳鑫玉, 杨曙光. 基于势场栅格法的移动机器人避障路径规划[J]. 控制工程, 2014, 01: 134-137.
- [23] 朱磊, 樊继壮, 赵杰, 吴晓光, 刘罡. 基于栅格法的矿难搜索机器人全局路径规划与局部避障[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 11: 3421-3428.
- [24] Chen C, Tang J, Jin Z G. A path planning algorithm research for seeing eyes robot based on visibility graph algorithm[J]. Computer Modelling and New Technologies, 2014, 18(11): 492-497.
- [25] 杨兵, 刘伟杰. 一种基于可视图的机器人避障路径规划[J]. 电脑知识与技术, 2009, 02: 434-435.
- [26] Song Q, Liu L X. Mobile robot path planning based on dynamic fuzzy artificial potential field method[J]. International Journal of Hybrid Information Technology, 2012, 5(4): 85-94.
- [27] 李奕铭. 基于人工势场法的移动机器人避障研究[D]. 合肥工业大学, 2013.
- [28] Soh C Y, Ganapathy V, Lim O C. Improved Genetic Algorithms based Optimum Path Planning for Mobile Robot[C]//2010 11th International Conference on Control Automation Robotics and Vision, Singapore: IEEE, 2010: 1565-1570.
- [29] 祁若龙, 周维佳, 王铁军. 一种基于遗传算法的空间机械臂避障轨迹规划方法[J]. 机器人, 2014, 03: 263-270.
- [30] Kim D H, Min B C, Lee M S. Fuzzy logic path planner and motion controller by evolutionary programming for mobile robots[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2009, 11(3): 154-163.
- [31] 曹萌萌. 基于模糊逻辑控制的动态行为移动机器人路径规划[D]. 北京交通大学, 2009.
- [32] Bin L, Jian C, Cheng D W. A Potential Function and Artificial Neural Network for Path Planning in Dynamic Environments based on Self-Reconfigurable Mobile Robot System[C]//2012 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, College Station TX: IEEE, 2012: 1-6.
- [33] 郭琦, 洪炳熔. 基于人工神经网络实现智能机器人的避障轨迹控制[J]. 机器人, 2002, 06: 508-512.
- [34] 杨剑峰. 蚁群算法及其应用研究[D]. 浙江大学, 2007.
- [35] 裴振兵, 陈雪波. 改进蚁群算法及其在机器人避障中的应用[J]. 智能系统学报, 2015, 01: 90-96.
- [36] 蒋卓强. 基于遗传模拟退火算法的静态路径规划研究[D]. 重庆大学, 2007.
- [37] 杜宗宗, 刘国栋. 基于遗传模拟退火算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机仿真, 2009, 12: 118-121+125.
- [38] 杨银涛. 基于A*算法的避障应用仿真[D]. 郑州大学, 2014.
- [39] 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭等. 基于A*算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报, 2010, 13: 109-115.
- [40] 丛岩峰. 基于滚动优化原理的路径规划方法研究[D]. 吉林大学, 2007.

- [41] 李加东. 基于RRT算法的非完整移动机器人运动规划[D]. 华东理工大学, 2014.
- [42] 何伟烽. 自主式移动机器人路径规划研究及软件仿真实现[D]. 西安电子科技大学, 2011.
- [43] 中国自动化学会机器人竞赛工作委员会, Robocup中国委员会. 中国机器人大赛武术擂台赛项目竞赛规则[EB].
- [44] 赵宝森, 许晓飞, 靳宸. 对抗机器人擂台定位设计[J]. 电子技术, 2015, 04: 89-91.
- [45] 李炜. 机器人擂台赛中隐形设计的可行性分析[J]. 西安邮电学院学报, 2012, S1: 19-23.
- [46] 李卫国, 王志刚. 进攻型武术擂台机器人的研究与实践[J]. 机器人技术与应用, 2009, 04: 41-43.
- [47] 李志凌, 周灿, 董国刚, 郭新亮, 邓本再. 武术擂台赛无差别组机器人目标搜寻策略[J]. 微处理机, 2013, 06: 63-65.
- [48] 周桔蓉, 孙旭日. 基于STM32的武术擂台机器人的设计[J]. 自动化应用, 2013, 11: 19-20.
- [49] 徐歌. 基于TMS320F2812的机器人控制系统的设计与实现[D]. 郑州大学, 2012.
- [50] 沈新锋. 武术机器人的研究[J]. 山东工业技术, 2014, 21: 212.
- [51] 孙旭日, 周桔蓉. 武术擂台机器人的研究与实践[J]. 中国水运(下半月), 2012, 10: 89-90.
- [52] 正点原子. STM32开发指南[EB].
- [53] Ardiyanto I, Miura J. Real-time navigation using randomized kinodynamic planning with arrival time field[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(12): 1579-1591.
- [54] Asensio J R, Montano L. A kinematic and dynamic model-based motion controller for mobile robots[C]//15th World Congress of the International Federation of Automatic Control. Barcelona: IFAC, 2002: 427-432.

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

陈昊，男，1987 年 5 月生。

2006 年 9 月-2010 年 6 月，就读于重庆大学通信工程学院通信工程专业，本科。

2013 年 9 月至今，就读于郑州大学信息工程学院集成电路工程专业，硕士研究生。

研究成果

- [1]. 2013 年 10 月，“2013 中国机器人大赛暨 RoboCup 公开赛，机器人武术擂台动作投影技术挑战赛”项目全国冠军。
- [2]. 2014 年 08 月，“2014 中国机器人大赛暨 RoboCup 公开赛分项赛，机器人武术擂台赛规定动作技术挑战赛”项目全国一等奖。
- [3]. 2014 年 08 月，“2014 中国机器人大赛暨 RoboCup 公开赛，机器人竞技工程竞速障碍赛”项目全国三等奖。

致谢

时光飞逝，三年的研究生学习生活即将结束，在此我要感谢母校和院系为我们提供了良好的学习和科研环境，谨向所有关心、帮助我的人表示感谢。

感谢邓计才教授这几年对我的悉心教诲和帮助指导。邓计才教授学识渊博、治学严谨、平易近人，在三年的研究生学习生活中给予了我很大帮助，并督促我不断提升自我、追求卓越。感谢张大伟老师为我提供的科研思路和技术指导，以及论文写作中的指导帮助。感谢赵广艳老师、张延彬老师、庞军老师、高明磊老师对我在学习生活中的帮助。

感谢郑州大学机器人实验室的所有成员，他们在我进行机器人制作和调试时给予了我很大帮助，和他们一起参加的各项机器人赛事促进了我科研能力的提升，培养了我良好的团队合作精神。感谢课题组的每位同学，正是平时的交流讨论使得我能更快进步。感谢我的室友在学习和生活中给予我的帮助和支持。

感谢我的家人，正是有了他们的理解和支持，我才能全身心地投入到研究生科研生活中。

最后，再次向所有关心我的老师、家人、朋友、同学表示最诚挚的感谢，祝愿他们身体健康，幸福快乐！