

分类号 _____



中原工学院

Zhongyuan University of Technology

硕士学位论文

MASTER'S DISSERTATION

论文题目: 室内清扫机器人的路径规划研究

研究生姓名: 徐 亮

研究方向: 智能控制

专业名称: 控制理论与控制工程

学科门类: 工 学

导师姓名、职称: 禹建丽 教授

二零一零年十二月

授予单位代码_____

学号或申请号_____

密 级_____

中原工学院

硕士学位论文

论文题目：_____室内清扫机器人的路径规划研究_____

研究生姓名：_____徐 亮_____研究方向：_____智能控制_____

指导教师：_____禹建丽 教授_____

指导教师单位：_____中原工学院_____

学科专业名称：_____控制理论与控制工程_____申请学位级别：_____硕 士_____

论文提交日期：_____2010 年 10 月_____论文答辩日期：_____2010 年 12 月_____

培养单位：_____中原工学院_____

学位授予单位：_____中原工学院_____

答辩委员会主席：_____惠延波_____

中原工学院 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中除了特别加以标注和致谢的地方外，不包含任何其他个人或集体已经公开发表或撰写过的研究成果。其他同志对本研究的启发和所作的贡献均已在论文中作了明确的声明并表示了谢意。

本人学位论文与资料若有不实，愿意承担一切相关的法律责任。

学位论文作者签名：徐亮

2011年01月12日

中原工学院 学位论文知识产权声明书

本人完全了解中原工学院有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属于中原工学院。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版。本人允许论文被查阅和借阅。学校可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密论文待解密后适合本声明。

学位论文作者签名：徐亮

指导教师签名：禹建丽

2011年01月12日

2011年1月12日

室内清扫机器人的路径规划研究

专 业： 控制理论与控制工程

硕 士 生： 徐 亮

指导老师： 禹建丽 教 授

摘 要

目前，服务机器人的发展已经渗透到人们活动的各个领域，从各方面来帮助人们的体力和脑力劳动，逐渐地为人们提供生活的便利。清扫机器人作为服务机器人领域中的一个新的产品，已经成为人们家庭服务当中的重要一员。清扫机器人要完成它的本职工作，环境建模和路径规划将是很重要的技术。环境建模的准确与否直接影响到清扫机器人的定位和导航。清扫机器人的路径规划不同于一般的移动机器人的路径规划，移动机器人的路径规划是按照某一性能指标搜索一条从起始状态到目标状态的最优或近似最优的无碰撞路径，即点对点的路径规划；而清扫机器人的路径规划是找到一条能够遍历室内环境的优化算法。这种优化算法是指机器人的路径拥有最大的覆盖率和最小的重复率，它们的关系就是“点”与“面”的关系。

本文应用栅格法来对室内环境建立一个环境模型，栅格法能够为机器人的空间感知和导航中的许多问题提供一个统一的解决方案，便于机器人进行路径规划。针对室内环境，本文采用犁田式的路径规划，相对来说比较容易实现，而且效率高、耗能少，能够完成遍历室内环境的任务。针对室内环境的一些特殊障碍物，如 U 型障碍物，本文采用了回溯法来遍历这种环境。经过仿真软件和在 AS-R 机器人平台上的实现表明，本文所研究的方法适合解决清扫机器人的路径规划问题，在室内环境中，能够使清扫机器人较好的完成相应的清扫任务。

关键词：清扫机器人 栅格图 路径规划 环境模型 完全遍历

Cleaning robot path planning under indoor environment

Speciality: Control Theory And Control Engineering

Name: Liang Xu

Supervisor: Professor Jianli Yu

Abstract

At present, various of service robots are designed and penetrated into every field of people's daily life. These service robots will replace people's labor as they deal with the works related to people's every day life, gradually to provide the convenience of people's life and improve the people's life. Cleaning robot as a new product in the field of service robots, has become an important part of the family service robots. In general, the cleaning robot has just started in our country. There are still many significant technical problems to be solved, such as environment model and the path planning. Environment modeling accuracy is very important, which will directly affect the cleaning robot localization and navigation. The path planning of cleaning robot is different from the general point to point planning method. The purpose of point to point is to search an optimized path from one point to another without bump obstacles. However, the cleaning robot must completely cover all the floor area in a room. There are two factors must be considered: the greatest coverage rates and the lowest recover rates.

In this paper, we propose a backtrack algorithm for local path planning based on zigzag pattern global path planning. The proposed algorithms rely on a priori knowledge of a 2D grid map of the environment. A map based approach is used to control the path execution, thus incorporating, in a natural way, the kinematic and the geometric model of the mobile robot on the path planning procedure. According to the indoor environment, we adopt the zigzag pattern path planning to traverse the environment. When the environment appears some complex obstacles, the path returns by backtracking in such a concave obstacle. Finally, we verify the effectiveness of the proposed algorithm through computer simulation. The simulation results indicate that the cleaning robot can avoid obstacles and finish the cleaning task along a zigzag pattern global path planning successfully.

Keyword: cleaning robot grid map path planning environment model
complete coverage

目 录

1. 绪 论.....	1
1.1 引言	1
1.2 国内外服务机器人的研究现状	1
1.3 国内外清扫机器人的研究现状	3
1.3.1 国外研究现状.....	4
1.3.2 国内研究现状.....	5
1.4 本章小结	6
2. 轮式机器人的体系结构和运动学原理.....	7
2.1 轮式机器人的体系结构	7
2.1.1 轮式机器人的体系.....	7
2.1.2 轮式机器人的功能模块.....	7
2.1.3 轮式机器人控制系统.....	10
2.2 轮式机器人的运动学原理	10
2.3 室内清扫机器人的关键技术	13
2.3.1 传感器技术.....	14
2.3.2 多传感器信息融合技术.....	15
2.3.3 环境建模.....	15
2.3.4 定位.....	16
2.4 本章小结	17
3. 室内清扫机器人路径规划技术简介.....	18
3.1 引言	18
3.2 路径规划技术	19
3.2.1 基于任务的规划方法.....	19
3.2.2 基于行为的路径规划方法.....	22
3.3 本章小结	25
4. 室内清扫机器人的路径规划算法研究.....	26
4.1 全局路径规划算法	26
4.1.1 螺旋式规划.....	26
4.1.2 随机式规划.....	27
4.1.3 犁田式规划.....	27

4.1.4 回溯算法的一般描述.....	28
4.1.5 回溯法的搜索过程.....	30
4.2 回溯法在清扫机器人路径规划中的应用	30
4.3 算法框图	34
4.4 本章小结	34
5. 室内清扫机器人路径规划实验研究.....	35
5.1 路径规划算法的计算机仿真	35
5.2 路径规划的机器人实现	40
5.3 本章小结	42
6. 总结与展望.....	43
参考文献.....	44
附录：攻读学位期间发表的论文.....	48
致 谢.....	49

1. 绪论

1.1 引言

“机器人”一词最早出现在文学和科幻作品当中，是捷克作家 Karel Capek 发表的一部名为《Rossum's Universal Robots》的科幻剧本中，把捷克语“Robota”写成了“Robot”的结果，而“Robota”是农奴的意思^[1]。在 1961 年诞生的第一台工业机器人以来，机器人的技术得到了迅速的提高。工业机器人^[2]的基本定义是：“工业机器人是一种具有自动控制的操作和移动功能，能完成各种作业的可编程操作机。”

随着科学技术的发展以及人们生活水平的提高，机器人的技术的到了迅速的发展。机器人的应用范围也已经从陆地发展到海洋和太空，利用移动机器人进行外界星球的探测和开发，已经成为本世纪世界各科技发达国家开发能源的主要手段之一。此外，机器人还应用到军事、建筑、交通、服务业、日常生活、医疗等多个领域^[3]。它不仅可以帮助人们摆脱一些恶劣、危险、难以达到等环境下作业，还因为机器人具有不知疲倦、操作精度高等特点，可以大大减轻人们的劳动强度、提高人们的生活质量。

虽然目前机器人的技术发展还未达到电影中的那么强大，但是机器人的技术正不断地渗透到人们执行的各个领域。而且逐渐地为人们提供便利，改善人们的生活。用不了多长时间，机器人将像电脑一样走进千家万户，为人们所利用。

1.2 国内外服务机器人的研究现状

服务机器人是机器人家族中一个年轻的成员，虽然起步相对较晚，但是到现在为止，服务机器人的发展已经取得了相当大的进步。服务机器人涉及的范围有从事清扫、维护保养、监护运输、修理、林业、救援等工作。服务机器人^[4]的定义如下：“服务机器人是一种半自主或全自主工作的机器人，它能完成有益于人类健康的服务工作，但不包括从事生产的设备”。

在服务机器人方面，欧美国家在这方面的起步较早。在上世纪的 70 年代中期 Spartacus 和 Heidelberg 的操作手项目^[5]。而在 80 年代，由于计算机技术和传感器技术在世界范围内的迅速发展，使得机器人技术的发展得到了快速的提高。1982 年荷兰开发的实验机械手，它主要能够完成喂饭和翻书的功能。1987 年，英国人 Mike Topping 研制了 Handy1 康复机器人样机^[6]，它能够帮助一个患有脑瘫的 11 岁男孩独立完成就餐。经过这些年的发展，Handy1 以它的简单性和多功能性吸引了很多残疾人群和护理人员的注意力。

进入到 20 世纪 90 年代以后，机器人的研制水平进入到了一个更高层次的研究，这是以更精确的传感器、信息处理技术和真实环境下的路径规划为标志的。1993 年，美国推出的主要用于医疗服务的商业化服务机器人 HelpMate^[7]，如图 1.1 所示。它可以根据传感器接收的数据自由的在医院完成送食物和药品的工作。



图 1.1 HelpMate 机器人

在亚洲，日本对机器人的研究一直都是非常靠前的。这主要是在日本政府的支持下来研究机器人的，此外，日本的一些企业也一直重视机器人的研究和开发。在服务机器人方面，从上世纪 90 年代以来，日本的医疗和福利机构一直基于残疾人和老年人的医疗器械设备产品的研发。在 1996 年本田公司推出了令世人瞩目的仿人机器人 P2 和 P3^[8]，它是世界上第一个能够自我控制并依靠两条腿走路的机器人，该机器人不但具有与人相仿得外形，而且可以独立行走并上下台阶和推车，实现独立操作。

在 2004 年 10 月，SECOM 公司开发了自助护理机器人“SECOM 升降机”^[9]，是专门来照顾那些行动不便的病人，它主要可以帮助行动不便的病人独自的从病床上换到轮椅或从轮椅到床上。

近几年来，日本的服务机器人的发展层出不穷，在很多技术都是走在科学的前沿。日本的日立公司成功开发的清扫机器人、索尼公司的“QRIO”和本田公司的“Asimo”等都取得了惊人的成功。另外，除了这些机器人外，日本还推出了大量的娱乐机器人，如弹钢琴的机器人、GUNDAM 机器人、Morph3 机器人、ApriAlpha 机器人等等，这些形形色色的机器人的不断出现，都促进了日本机器人技术的更快的发展。

我国的服务机器人的研究相对于国外来说起步较晚，与世界上的发达国家还有着明显的差距。到 20 世纪 90 年代的时候，我国的科研人员才对服务机器人开始关

注。在这将近二十几年时间里，在国家的支持下，特别是在国家“863”计划的支持下，我国在服务机器人方面的研究也取得了重大的进展。1995 年清华大学为残疾患者研制的一个 7 自由度移动式护理机器人，它是放在医院的病房或是患者的家中，主要是帮助病人在无人看护的情况下护理病人，帮助病人取药、送水、翻书和操作家中的家用电器等任务^[10]。

由北京航空航天大学、清华大学和海军总医院共同研制开发了神经外科手术机器人。该机器人是由五个关节组成，前面两个关节是可以移动的，而后三个关节只能转动。神经外科手术机器人在几家医院的推广效果来看，已经取得了良好的效果和社会效益^[11]。

针对我国步入老龄化社会的问题，人口的老龄化对社会医疗器械提出了更严峻的要求，鉴于此，华南理工大学提出了一种基于机器人多轴协调控制技术和语音识别技术的多功能护理床的概念，并在此基础上研制了一套基于该护理床的社区监控系统^[12]。它有 7 块相互独立的面板组成，各个床面板之间可以实现相互的协调运动，通过单动或联动方式来实现病人所想的各种位姿，并且在语音或键盘的控制下可以进行多位姿的实现。

此外，哈尔滨工业大学又研制了“清扫机器人”、“护士助手”、“迎宾机器人”和 2007 年 4 月研制出的“青青”智能服务机器人^[13]，还有中国科学院的“艾姆”智能保安机器人和智能轮椅等。这些机器人在智能化方面都达到了一定的深度，机器人可以在一定的空间中自由的行走，能够避开障碍物，甚至还能与人进行一些简单的交流，这些在国内都属于领先水平。

1.3 国内外清扫机器人的研究现状

清扫机器人是服务机器人领域中的一个新的产品，清扫机器人又叫吸尘机器人或是自动清洁机器人。其研究开始于 20 世纪 80 年代，到 90 年代的时候，在西方的一些发达国家就相继研制出了清扫机器人的样品。清扫机器人的产品到现在为止推出的并不多，即使有一些产品推出了，但是并不是很成功。作为一种令人满意的清扫机器人应当具有自动清扫整个房间或办公室，还有这个清扫的过程中并不需要人的帮助。作为自动清扫机器人，在机器人的电量过少的时候，它应当能够自动充电。在清扫完毕时，能够自动地把装满的垃圾给倒了。还有在室内工作的时候，它发出的声音不能太大。作为消费者而言，最关心的就是它的价格不能太贵，这样对于广大的普通家庭来说才能买得起。对于清扫机器人的这种特点，使它成为现在家用电器领域中最具挑战性的热门课题。

1.3.1 国外研究现状

英国 Dyson 公司生产的第六代产品——DC06 型自主式真空吸尘器^[14,15,16]，如图 1.2 所示，这个自主真空吸尘器是 James Dyson 在 1979 年发明的。双旋风机形成的气旋效应能够使吸尘器产生持续、强劲的吸引力，而没有使用这项技术的吸尘器，在长时间的使用之后吸引力就开始逐渐减弱。在导航和路径的控制上，该吸尘器采用了螺旋形的路径规划。利用传感器传递的数据使它自动地确定往哪个方向自主的

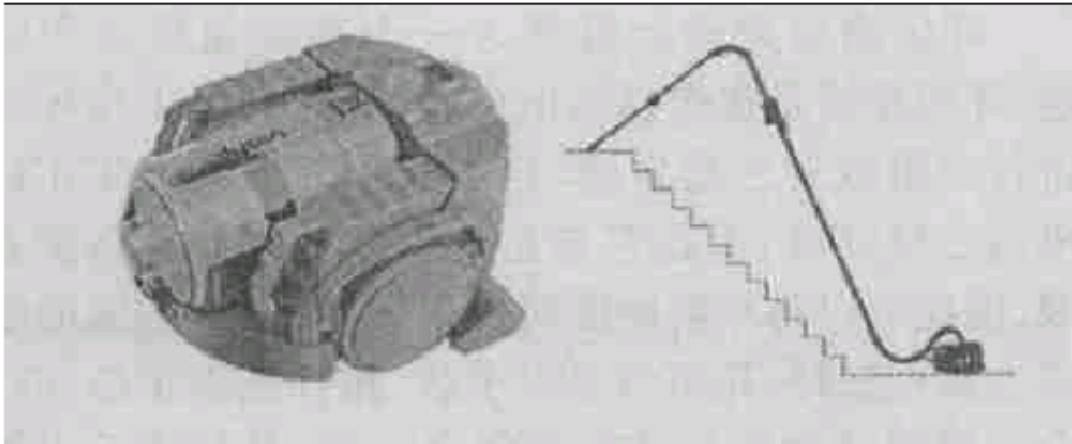


图 1.2 DC06 型自主式真空吸尘器

行走。但是它有一个严重的缺陷，DC06 使用了 70 多个感应器和 3 台微型电脑，这使它的价格非常高达到 3500 美元，这是其他吸尘机器人无法比拟的。

2003 年 5 月，日本日立公司成功地推出了家用清洁机器人^[17,18]。如图 1.3 所示，这种机器人能够在房间中自由地行走并且清扫卫生。这次该公司在设计上有了独特的风格，机器人的尺寸为业界最小。另外在机身的下部设计了一个可以自由伸出 5cm 左右的“可动吸口”，即便机器人走到房间的某个角落后，仍可用吸尘口自动伸出，将角落打扫干净。此机器人的其它的附加功能并不是很多，因为清扫机器人在技术上最难实现的是如何让机器人将环境打扫的更干净，日立公司就是以此为重点进行开发的。该清扫机器人投放市场后预售人民币为 1.35 万元左右。

在 2002 年 9 月，iRobot 公司推出的家用清洁机器人——“Roomba”机器人^[19]，如图 1.4 所示，这是一个直径为 34cm，高度为 10cm，并且重量只有 2.7kg 的非常轻巧的清洁机器人，通过它自带的碰撞传感器和下视传感器，它可以很方便的进入到各种狭小的区域清扫，Roomba 是以碰撞地方式来感应障碍物的，它特殊的障碍物感应调节器会挡住墙壁而保护机身不受损坏。当检测到有障碍物时，机器人就绕障碍物行走一圈来清扫，然后按照既定的路径进行清扫。在运动墙角时，该机器人可以利用右前方的旋转边刷将墙角的灰尘清扫干净。这款机器人以惊人的 199 美元超低价格面世，因此得到了非常大的关注。

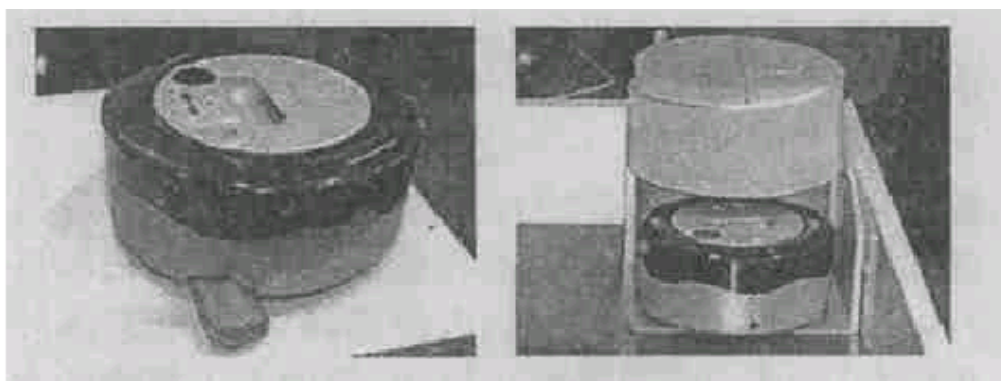


图 1.3 日立清扫机器人

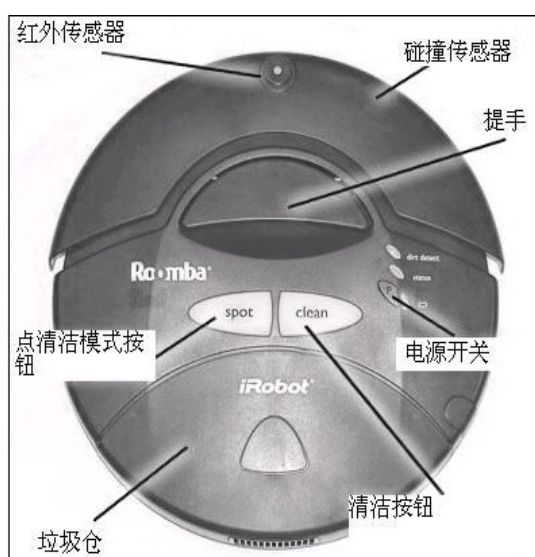


图 1.4 “Roomba”机器人

1.3.2 国内研究现状

清扫机器人在我国的研究相对比较晚，到现在为止各种清扫机器人的研究仅仅局限于各学校或研究所的实验室内，我们在市面上能见到的产品并不多。虽说起步晚，但是在这方面我们也取得了不错的成绩。在现有的清扫机器人产品方面，我们研制的机器人的用途大致可以用于三个地方，清扫地面、玻璃墙壁和管道。浙江大学是我国最早开始研究清扫机器人的大学。从 1999 年到现在为止已经开发出了几代的样机，第一代样机已经具备了初步的智能，可以自主的识别障碍物。第二代样机则有了更高的自主性，可以在无人帮助的情况下，自动地清扫房间^[20]。哈尔滨工业大学也进行了清扫机器人的研究，与香港中文大学合作，联合研制开发出一种全方位移动的清扫机器人。该机器人是采用全方位移动的技术，使之能够遍历到房间的每个空间进行清扫，包括房间内的狭小区域和盲区。机器人的身上装有声纳、红外等多种距离传感器，可以使机器人适应复杂多变的室内环境。通过传感器得到的信息可以观察空间障碍物的分布情况，而且可以实时地避开障碍物。

除了以上讲到的几所学校外，还有好多的学校或是研究院也在从事着清扫机器

人的研究，如东北大学、清华大学、华南理工大学、上海交通大学机器人研究所、西安交通大学人工智能与机器人研究所等都对地面清扫机器人做了相关的研究，但是最终都没有形成相关的产品面世。

为解决高楼墙壁和玻璃的清扫难题，北京航空航天大学机器人研究所研制出了一台玻璃顶棚清洗机器人。该机器人重 25kg，它可以在玻璃面爬行并且完成相应清扫的任务，而且根据现实的情况能够自主的行走和清洗。这种机器人是通过吸附的方式来固定住自己机身的。通过吸附的机器人在我国也已经面世，并且在好多地方已经得到了应用，比如在大庆油田就用到了这项产品。

为解决空调通风口的清洁问题，中国科学院研发了管道清洁机器人，它可以替代人成功解决空调管道清洁的问题。这种机器人是根据空调管道的尺寸 400 毫米*400 毫米和 400 毫米*500 毫米的来设计的，因此可以知道这种机器人的尺寸较小，行动比较灵活。工作人员可以在管道的外部来控制安装在机器人上面的清洁系统来实现管道内的清扫。。同国外的相同产品相比，我国的清洁机器人成本低、操作更可靠等特点，在控制系统、照明系统、清洁系统都有了明显的创新^[21]。

1.4 本章小结

本章回顾了国内外的移动机器人的发展背景，对国内外的服务机器人的研究动态分别作了阐述和总结。还有对各国的清扫机器人做了比较，说明我国的清扫机器人的现状和存在的不足。

2. 轮式机器人的体系结构和运动学原理

2.1 轮式机器人的体系结构

2.1.1 轮式机器人的体系

本实验采用的是 Grandar 的 AS-R 研究版的轮式机器人研究平台。



图 2.1 AS-R 机器人

AS-R 机器人的外形尺寸为长 50cm，宽 50cm，高 63cm。有三个轮子支撑，前面两个驱动轮，后面有一个万向轮来保持机器人的平衡。该机器人的最大的负载能力达到 30kg，最大的速度达到了 2.75m/s，能够适应在室内环境的地板、地砖、地毯等环境中运行。AS-R 采用的是锂电池动力电池，每次充电 10 小时即可运用，而且电池更换方便，可单独拆装。该机器人采用模块化结构，分为动力、控制和传感三个模块。

2.1.2 轮式机器人的功能模块

AS-R 的主要模块分为传感器模块、视觉模块、语音模块、通讯模块和运动模块，如图 2.2 所示，模块各部分的关系：

1. 传感器模块

在传感器模块中，包括红外线测距、音频采集和播放、视频采集和播放、超声

波测距和 GPS 定位系统。其中 5 个声纳和 4 个红外测距传感器等间隔的分布在机器人感知模块的四周。根据传感器的数据建立机器人的环境模型，从而实现机器人的多传感器的信息融合和最终的路径规划。如果现在的传感器不能够完全的测量用户满意的数据，用户可以根据自己的需要相应的增加传感器的数量，通过 A/D 数据采集卡获取传感器的数据。声纳传感器的工作原路如图 2.3 所示：

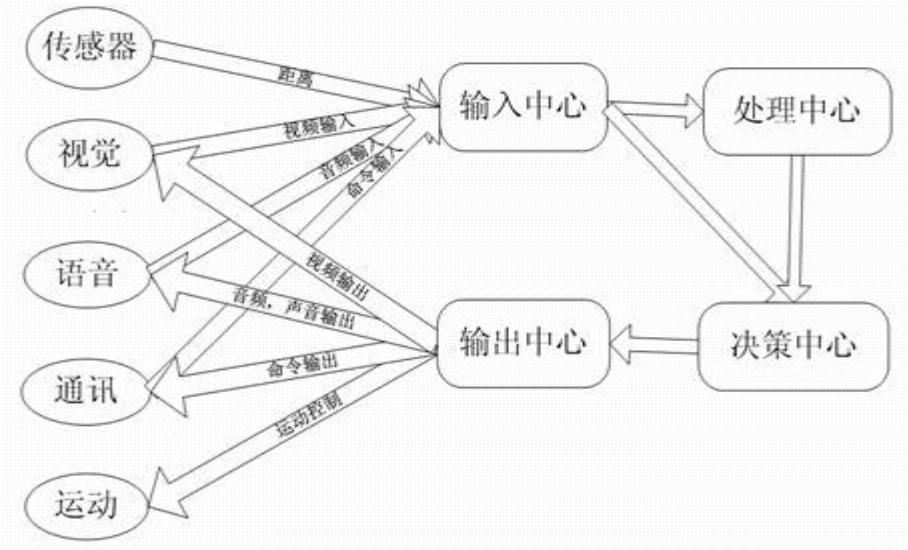


图 2.2 模块各部分关系

声纳通常采用渡越时间法来测量距离的：声纳发出一束超声波在空气中传播时，直到遇到障碍物时，超声被就被反射回来。然后声纳将此返回信号接收。根据声纳发射与接收之间的时间差来计算超声传感器到障碍物之间的距离，声纳的测距原理图如 2.3 所示，具体公式见式（2.1）

$$d = vt / 2 \tag{2.1}$$

- 式中：d——超声传感器到障碍物之间的距离；
t——超声波从发射出去到返回接收超声波之间的时间差；
v——超声波在空气中的传播速度，随温度的不同而改变；

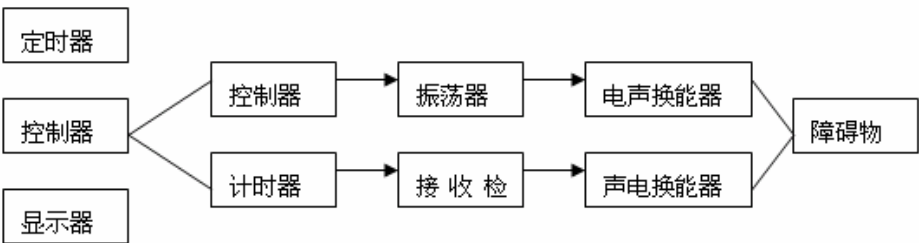


图 2.3 声纳测距原理

红外线的测距原理：

红外线传感器是一种对入射光位置敏感的光电器件，包括光学系统、检测元件和转换电路。通过感应器件感光面不同位置的当入射光时，红外传感器就相应

的输出不同的信号，通过对这些不同信号的判断，就可以确定入射光在红外传感器感光面上的不同位置。红外传感器的距离测量是采用了光学三角测量的原理。测距原理同超声测距原理相似，红外线传感器具有一对红外信号发射与接收的二极管，当发射管发射某一频率的红外信号时，接收管就接收该频率的红外线信号。当红外信号遇到障碍物时，红外信号反射回来被接收管接收，经过处理之后就得到障碍物到传感器之间的距离。如图2.4所示，可得出传感器到障碍物的距离D为：

$$D = bf / x \tag{2.2}$$

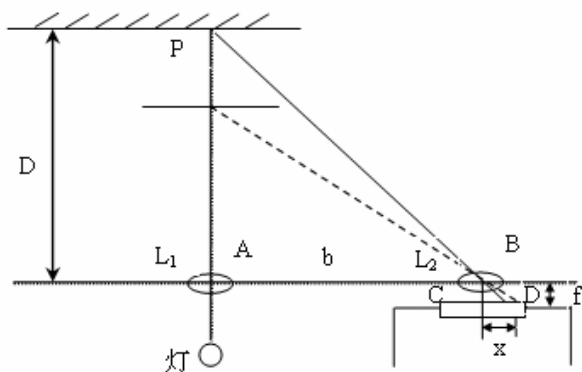


图 2.4 红外线测距

在视频采集模块中，可以实现视频图像的采集和播放，通过所采集的视频，可以实现对视频数据的处理，包括图像处理、视频压缩与编码等研究。AS-R 机器人缺省配置是一个 USB 接口的 CCD，该视觉系统具有一定的局限性：CCD 是固定的，不能够旋转，无法自由获取所需要的目标；不能测量目标物体的距离。因此视觉系统需要相关的扩展。

2. 通讯模块

通讯模块实现对网络的操作。包括网络数据的广播和传输、网络的侦听、数据的 IP 组播和对网卡操作监控。该模块可以实现机器人的远程控制和监督。

3. 运动控制模块

运动控制模块位于机器人最下层，运动控制卡是 AS-R 机器人运动控制模块中最主要起作用的，该运动控制卡拥有三轴运动控制卡，但是出产时只用了其中的两轴，如有需要可将另外一轴用于扩展使用。其中的两轴分别控制着左、右两个电机，进而控制着机器人的左、右轮子的速度。电机驱动的控制信号是由运动控制卡的 PWM 信号通过处理和转接输入到电器驱动器来提供的。如果想要调节机器人的速度可以通过调节 PWM 信号的不同占空比来实现。AS-R 机器人系统的运动控制室完全基于 PC 架构的开发式控制器，可以实现运动控制卡实时控制机器人运动和实时获取编码器的数据。

4. 图像处理模块

图像处理模块实现对所采集图像的处理。包括图像的各种处理算法、图像的保存、图像中颜色的转换、物体的识别定位和图像的编码等等。

2.1.3 轮式机器人控制系统

AS-R 机器人的控制系统如图 2.5 所示：

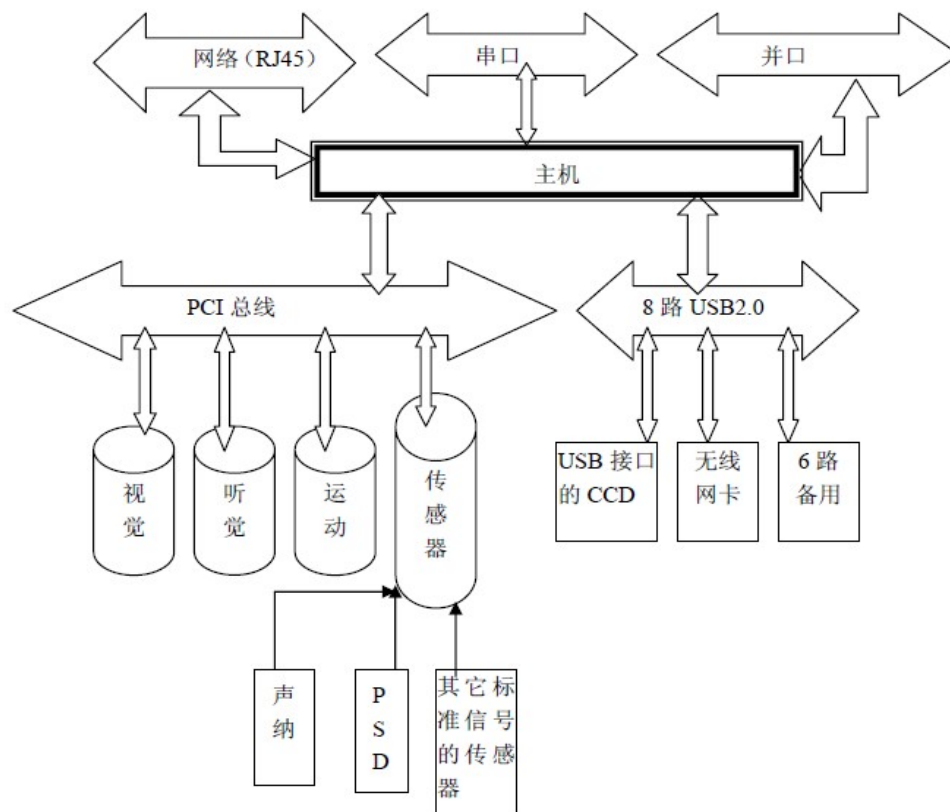


图 2.5 机器人的控制系统

从上图可以看出 AS-R 机器人是开放式的机器人，系统采用了标准的数据总线和外界进行数据通讯。只有符合这些标准的都可以在 AS-R 上使用，因此机器人的外扩能力较强。AS-R 采用的是基于工业 PC 架构，软件平台式基于 VC 开发环境，具有良好的人机界面。

2.2 轮式机器人的运动学原理

在轮式移动机器人中，根据驱动轮转向方式的不同，可以分为导向驱动式和差动驱动式。在导向驱动式的移动机器人中，由驱动轮决定机器人的运动速度，由导向轮决定其运动方向。在差动驱动式移动机器人中，由两个驱动轮的速度差决定其运动方向，以它们的平均值作为机器人的运动速度。AS-R 机器人采用的是差动驱动的方式，通过控制左、右轮的速度来控制机器人的运动方向。在采用差动驱动的方式来控制机器人运动的时候，对 AS-R 机器人做如下的假设：

1. 机器人的左、右两个轮子的尺寸相同，其在运动的时候两轮子的圆心在同一水平面上；
2. 机器人在二维的平面上运动，即运动的地面为光滑的地面，没有凹凸不平的地方；
3. 机器人的轮子与地面保持点接触，忽略所有轮厚度对机器人的影响，并且接触点处只有纯滚动而不发生相对滑动（包括侧向和纵向滑动）；
4. 机器人具有刚性的外壳，运动的时候两个轮子并不发生变形；

从上面的假设可以看出，这是一种非完整性的约束条件，近年来对这种约束条件的研究非常重视，使得机器人在非完整约束条件下运动非常普遍。主要源于这种方法非常简单，适合于机器人的研究。

机器人的运动模型如图 2.6 所示：

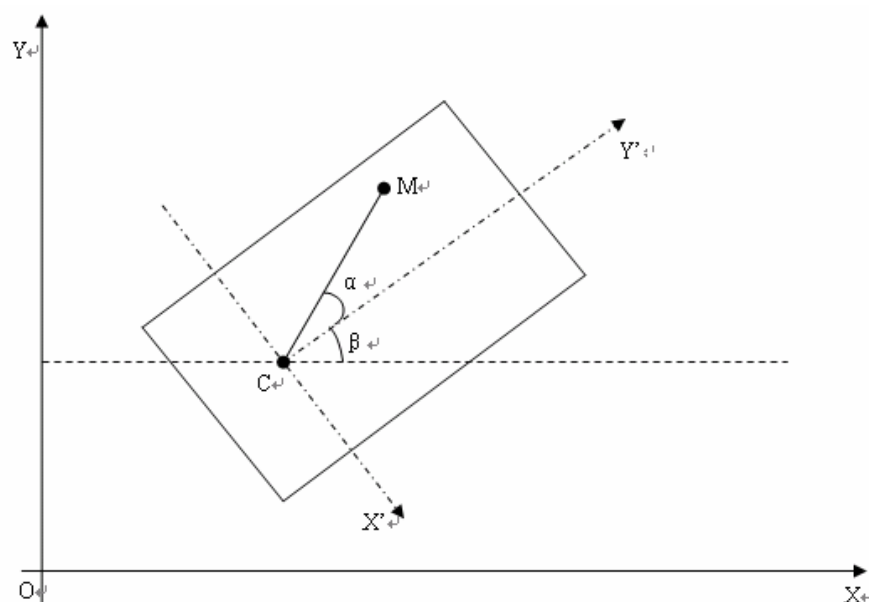


图 2.6 机器人的运动模型

图中分别表示了机器人的局部坐标系 $X'^jY'^j$ 和环境全局坐标系 OX^jY^j 。机器人的局部坐标系 $X'^jY'^j$ 是以机器人的两个驱动轮连线的中心为原点建立坐标系。在上述假设条件下，机器人的位姿可有由全局的坐标向量 $\mathbf{P} = [x_m, y_m, \beta]^T$ 来表示，其中 (x_m, y_m) 表示机器人在全局坐标系下的坐标， β 为机器人的方向角，即机器人的局部坐标系相对于全局坐标系的角度（顺时针为正，逆时针为负）。机器人的两驱动轮之间的轴间距为 d ，驱动轮的半径为 b ，局部坐标系的顶点的坐标为 (x_c, y_c) ，任意一点 M 与 C 点的距离为 l ，直线 $|MC|$ 与机器人的中轴线（即图中的 CY' ）之间夹角为 α ，根据上图可得机器人的运动模型如下：

$$\begin{cases} x_m = x_c + l \cos(\alpha + \beta) \\ y_m = y_c + l \sin(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (2.3)$$

对(2.3)所示的方程对时间 t 求导可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_m = \dot{x}_c - l \dot{\beta} \sin(\alpha + \beta) \\ \dot{y}_m = \dot{y}_c + l \dot{\beta} \cos(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (2.4)$$

对于图 2.6 所示的机器人平台模型, 可以将两个驱动轮简化为在两个驱动轮轴连线中点 C 处的单个驱动轮, 由于单轮滚动的运动速度满足:

$$\dot{x} \sin \psi - \dot{y} \cos \psi = 0 \quad (2.5)$$

因此, 机器人的虚拟单个驱动轮系统所受的非完整性约束为:

$$\dot{x}_c \sin \beta - \dot{y}_c \cos \beta = 0 \quad (2.6)$$

根据式(2.4)和(2.6)可得

$$\dot{x}_m \sin \beta - \dot{y}_m \cos \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha = 0 \quad (2.7)$$

即

$$[\sin \beta, -\cos \beta, l \cos \alpha] \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.8)$$

上式就是在 M 点的坐标和方向角为 β 作为环境全局坐标下的和系统受非完整性运动约束的方程。当机器人左、右两轮的旋转速度分别为 ω_1 和 ω_2 , 则存在下面的关系:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = \frac{1}{2}(r\omega_1 + r\omega_2) \cos \beta \\ \dot{y}_c = \frac{1}{2}(r\omega_1 + r\omega_2) \sin \beta \\ \dot{\beta} = (r\omega_2 - r\omega_1) / d \end{cases} \quad (2.9)$$

根据式(2.4)和(2.9)可得

$$\begin{cases} \dot{x}_m = [\frac{b}{2} \cos \theta + \frac{bl}{d} \sin(\beta + \alpha)]\omega_1 + [\frac{b}{2} \cos \beta - \frac{bl}{d} \sin(\beta + \alpha)]\omega_2 \\ \dot{y}_m = [\frac{b}{2} \sin \theta - \frac{bl}{d} \cos(\beta + \alpha)]\omega_1 + [\frac{b}{2} \sin \beta + \frac{bl}{d} \cos(\beta + \alpha)]\omega_2 \\ \dot{\beta} = (b\omega_2 - b\omega_1) / d \end{cases} \quad (2.10)$$

即

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{b}{2} \cos \beta + \frac{bl}{d} \sin(\beta + \alpha) & \frac{b}{2} \cos \beta - \frac{bl}{d} \sin(\beta + \alpha) \\ \frac{b}{2} \sin \beta - \frac{bl}{d} \cos(\beta + \alpha) & \frac{b}{2} \sin \beta + \frac{bl}{d} \cos(\beta + \alpha) \\ -b/d & b/d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

上式就是以 M 点为任意一点描述的双轮差动移动机器人的运动模型，其所受的非完整性约束为方程(2.8)，当 M 点选择为点 C 时，机器人平台的运动模型和约束方程分别简化为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{b}{2} \cos \beta & \frac{b}{2} \cos \beta \\ \frac{b}{2} \sin \beta & \frac{b}{2} \sin \beta \\ -b/d & b/d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

和

$$\dot{x}_c \sin \beta - \dot{y}_c \cos \beta = 0 \quad (2.13)$$

从上面的机器人的运动模型可以看出，机器人在环境全局坐标下的坐标分量： x 、 y 和 θ ，而机器人的控制分量只有左、右两个驱动轮的旋转角速度 ω_1 和 ω_2 ，这就是典型的非完整性约束问题。在机器人的运动过程中，上述的运动模型方程始终满足，这就说明机器人运动时的瞬时速度方向和机器人的瞬时朝向完全相同^[22]。

2.3 室内清扫机器人的关键技术

清扫机器人的导航系统的研究还处于发展阶段，很多理论还需要进一步的完善，同时也需要在实际的应用中不断地实践和积累。清扫机器人系统一般由 4 部分组成：移动机构、感知系统、控制系统和吸尘系统。机器人的移动有多种方式：轮式、摆动式、履带式、蠕动式、步行、跳跃式等等。而清扫机器人采用的大都是轮式移动，这主要是源于轮式移动机械结构比较简单、操作性较好、运动的灵活性较

大等优点所决定的，在轮式移动中可以方便的测出机器人的运动速度。感知系统是清扫机器人的重要组成部分，是机器人的视觉器官，只有通过感知系统，才能够完成机器人的定位、避障等重要工作。清扫机器人的价格的高低很大程度上是与所选的传感器有关，价廉物美的传感器现在越来越受到人们的青睐，如声纳和红外传感器，因此传感器技术不容忽视。机器人的控制技术多种多样：有基于单片机、PLC 和基于 DSP 的控制系统。机器人的设计方式虽然多，但是总的性能要求机器人：稳定性好、精度高以及响应性要好。吸尘系统和普通的吸尘器还不太一样，要求在设计形状和结构上要有所不同，因为这不是本文讨论的重点就不展开讨论了。现在的清扫机器人发展较快，但是影响清扫机器人的关键技术还是传感器技术、多传感器融合技术、环境建模、定位等。

2.3.1 传感器技术

清扫机器人的传感器就是能够把外界的环境信息传递给机器人，让机器人通过传送过来的数据实现自身的运动，因此，传感器就好比机器人的眼睛，通过其观察环境从而实现其自主运动。机器人的传感器大致可以分为两种：内传感器和外传感器。内传感器主要是用来测量机器人的自身运动状态的信息。外传感器是用于机器人对外界环境和障碍物的分布情况的检测，使机器人能够通过这些检测信息调整自身的状态，从而实现在空间环境的无碰撞行走。目前外传感器有：红外传感器、超声波传感器、视觉传感器、激光传感器、接近和接触传感器等。其中红外传感器、超声波传感器、激光传感器这些是用来测量距离的，因此也被称为距离传感器，视觉传感器是用 CCD、CMOS 等摄像头用于视频拍摄的，而接近和接触传感器则是用与壁障规划的，也叫碰撞传感器^[23]。超声传感器具有成本低廉、距离分辨率高、硬件简单等优点，但是也具有一定的局限性，表现在测量容易产生盲区、波束角较宽、方向分辨率差和有镜面反射现象，容易产生误差^[24]。红外传感器则与超声传感器的特点相反，因此在机器人上可以将它们相互结合着用。红外传感器的方向分辨率较高，扩散角小，不会产生反射问题。但是距离分辨率差，不能感知某些透明物体。

传感器的技术远远赶不上计算机技术发展的速度。传感器一般是由敏感元件、基本转换电路和转换元件组成。要制造高性能的传感器时，即要求传感器精度要高、可靠性好和稳定性好，而且具备一定的数据处理能力，仅靠改进材料工艺很困难，因此需要利用计算机技术与传感器技术相互结合，弥补其性能不足。这就要用到多传感器信息融合的技术。

2.3.2 多传感器信息融合技术

传感器信息融合能够实现机器人准确和实时地感知外界环境，并且完成相应的任务，这是机器人了解环境和不断学习的主要方法。现在机器人的周围安装了很多的传感器，而如何管理这些传感器就成了一个迫切解决的问题。管理这些传感器就是为了能够让机器人更精确地导航和定位。多传感器的信息融合的实质就是对多个不确定性信息的分析与综合，可以增强系统的分辨能力和数据的可信度，适合于清扫机器人在复杂环境中的环境建模、定位和导航。目前常用的信息融合方法有：加权平均法、贝叶斯估计^[25]、D-S 证据推理^[26, 37]、卡尔曼滤波^[28]、统计决策推理、模糊几何理论、人工神经网络^[29]和遗传进化算法等。

在 20 世纪 60、70 年代，Dempster 和 Shafer 分别对 D-S 证据推理做了阐述。这种推理是贝叶斯估计的扩展，能够为不确定信息表达和综合提供了非常有效的方法，是决策级的信息融合。对于信息的已知性、确定性、未知性和不确定性它都能够很好的表达。缺点是精度不高，在实际的一些应用中不能够有效的获取证据，从而使其应用范围得到了限制。人工神经网络是对知识信息的一种融合方法，其实质是对一个不确定的信息的推理过程。常用的方法有：径向基（RBF）网络、反向传播（BP）网络和自适应共振理论（ARF）等，通过人工神经网络的学习，能够将不确定的空间环境的复杂关系，融合为机器人能够理解的信息。如果将人工神经网络和模糊推理同时使用，则可以得到更精确的导航和定位效果，缺点是机器人需要学习，将要处理很多的实时的数据，不利于机器人的判断^[30]。

每一种信息融合技术都有它们的优点和缺点，用测距传感器和视觉传感器的信息融合来实现三维建模和机器人的避障，测距传感器之间信息融合用来实现机器人的定位和导航等。因此，在实际的应用中应该根据实际情况选择合适的融合方法。

2.3.3 环境建模

环境建模是清扫机器人的另一个重要的课题，它是建立在传感器信息基础上的，对环境进行二维模型的重建。虽然清扫机器人工作在三维空间环境中，但是总是约束在地面清扫，因此可以将机器人工作的环境地图描述为一个二维地图。机器人通过自身传感器建立局部环境地图，然后通过局部环境地图与全局地图的比较，来确定机器人在环境中的全局位置和方位。常用的环境地图建模方式主要有三种：拓扑图、几何特征图和栅格图。

拓扑图^[31]是用一张有拓扑结构的图来表示环境，图中的节点分别对应于环境中的一个特征状态或是地点。节点之间的连接就描述了空间不同物体或是环境之间的关系。因此，拓扑模型建立的过程实际上就是节点识别的过程，对于各种拓扑建模方法的差别主要体现在节点如何构成、不同的节点如何识别和传感器的观察不确定

性如何处理。这种方法建图的抽象度较高，搜索空间和存储都相对比较小，特别适用于面积较大空间的环境建模（如广场等地方）。

几何特征地图^[32]是清扫机器人通过传感器对环境的感知，从中提取出环境的几何特征，例如点，线段或曲线等，使用这些几何信息来建立的环境模型。在清扫机器人的工作环境中，可以将环境提取出更加抽象的几何信息，例如面、角、边的集合或者门、墙壁、走廊等。一般来说这种方法能够比较精确地描述结构化的环境，获得较为准确、直观的图，便于机器人的定位和目标识别。但是如何从传感器的数据中提取出稳定的环境几何特征，使之不会随机器人的运动和环境变化而发生改变，以及定位与模型变化时如何根据传感器采集到的几何特征在全局地图中寻找对应的信息，即数据关联问题^[33]。如果该关联问题不准确将导致机器人无法建模与定位。

栅格地图^[34]是近年来应用比较广泛的一种环境建模方式，具体的说就是把清扫机器人的工作环境分成许多大小相等的栅格，通过每个栅格的概率值来进行空间状态的描述——空间栅格被障碍物占据或没有被障碍物占据。可知栅格地图容易创建和维护，利用声纳或红外等距离传感器可以很方便地将障碍物的分布情况直接反映到栅格地图中，栅格地图中的障碍分布情况直接与室内环境中的确定位置相互对应。占据的栅格地图能够表示环境中障碍物的任意分布情况，不过地图的精度可以通过栅格的分辨率来调节。如果将栅格选的太小话，环境的分辨率就会很高，所画的栅格地图可能不能完全表示机器人走过的位置，因此它的抗干扰能力小，环境的信息存储量就大，最后导致机器人的决策速度慢；如果栅格选的太大话，机器人的抗干扰能力就强，相反的环境的存储量就小，致使机器人的决策速度快，但是分辨率就下降了，可能机器人走了很小的一段距离，并不能在栅格图中观察到机器人的运动，而且在障碍物复杂的环境在中寻找路径的能力就减弱。因此，栅格的分辨率一定选取的合理，否则将给机器人的运动带来一定的问题。

2.3.4 定位

定位也是机器人中一项非常重要的课题，机器人要想高效率地在环境中运动并且到达目的地，就要实现准确定位，它的准确与否直接关系到机器人的路径规划的效率。机器人的定位就是对自身位置的确定，就是机器人的位姿的估计，包括机器人的位置（横坐标 x ，纵坐标 y ）和方向角 θ ，

机器人的定位基本上可以分为三种：推测航行法、参照物定位法和混合定位法。推测航行法有测距法和惯性定位法。测距法就是通过编码器来记录车轮转动圈数进而计算出机器人的位置和姿态。惯性定位法是利用积分法来对陀螺仪和加速度计的测量的结果进行一次或两次积分得到机器人的位置信息。由于对结果的积分而引入

了惯性传感信息的时间漂移。经过积分之后任何微小的常量误差都会产生误差的积累,因此对于长时间的精确定位,惯性定位法会产生较大的误差。参照物定位法有:全球定位法、磁罗盘法、路标导航定位法、主动灯塔法和模型匹配法。磁罗盘法可以为机器人提供相对准确的绝对位置信息,只不过在现实的应用中受到一定的限制,它容易受到有磁性物质的影响。全球定位系统适用于导航和定位在室外运动的机器人。一般来说,地面机器人接收到的三颗卫星的准确距离信息就能够计算出机器人的准确位置,但是在实际中,利用 GPS 导航产生的误差较大,当前用的比较多的是差分全球定位系统(DGPS)。混合定位法是将前两种方法相结合来实现机器人的定位,包括了:基于多传感器信息融合的定位和视觉定位法。视觉定位法就是使用摄像机如 CCD 摄像机来获取现实环境的图像,但是不可避免的就是难以将目标与背景区别开来。而又将目标与背景分开,则需要大量的算法,这将导致系统的实时性差^[1,35,36]。

从上的分析可以看出,每一种方法都难以达到令人满意的定位效果,因此可以将两种或是两种以上的方法结合起来用来相互补偿各自的缺点,而多传感器的应用是今后发展的重点,从传感器中获取更多的信息,同时使用概率融合技术才有可能得到等准确的机器人定位。

2.4 本章小结

本章主要对 AS-R 机器人的硬件结构做了说明,在硬件的基础上说明了机器人的各部分的功能模块,以及各部分功能模块的组成以及它们的作用,此外还说明了机器人的控制系统,良好的人机界面,使得机器人的能够方便的操作。还讨论了机器人运动学模型,说明了在非完整性约束条件下的机器人的运动模型。最后对室内清扫机器人的关键技术做了详细的说明,和今后应该重点发展的技术。

3. 室内清扫机器人路径规划技术简介

3.1 引言

移动机器人是根据传感器来感知环境信息和通过自身位置状态的调节，在未知的环境中，完成一定任务的机器人系统。移动机器人的路径规划是研究机器人导航的一个重要的课题。路径规划就是指移动机器人按照某一性能指标搜索一条从起始状态到目标状态的最优或近似最优的无碰撞路径^[37]。而清扫机器人的路径规划是找到一条能够遍历室内环境的优化算法。这种优化算法是指机器人的路径拥有最大的覆盖率和最小的重复率。清扫机器人的路径规划与一般机器人的点到点的路径规划有着明显的差别。清扫机器人的路径规划是一种全局规划，是机器人在一定的时间内覆盖整个室内环境。而点到点的路径规划是机器人只要找到一条从起点到目标点的路径即可，这两种情况就好比“面”和“线”的关系。而它们的共同点就是在某一起点开始后，经过一系列的路径搜索，最终完成相应的任务并且可以自主的避开障碍物。但是全局覆盖还有一个优化的指标，不能为完成任务而不考虑重复率。现在的清扫机器人的路径规划没有得到足够的重视，源于人们还是将大量的精力放在了机器人的点对点的路径规划上面。而现在随着科技的发展，清扫机器人显示了广泛的应用前景和商业市场，因而成为了现在学术界的一个重要的研究课题。

在机器人的路径规划过程中所涉及到的一些问题包括：机器人利用自带的传感器建立的环境模型，怎样才能建立更真实的反应环境的信息；即使机器人创建了一个较为精确的室内环境模型时，用怎样的算法才能使机器人无碰撞的找到一条能够遍历室内环境的优化或接近优化的路径；机器人在静态的室内环境遍历时，能够比较好的完成任务，但是在复杂多变的环境中时，比如在有运动障碍物的环境中时，机器人的路径规划如何，壁障又如何；如何利用现有的已知的所有条件来规划机器人的运动，从而得到相对更优的决策效果。目前的这些问题在现有的条件上并不能很好的解决，而清扫机器人要想更好地发展这些问题将是必须解决的。

一个算法优良的清扫机器人的路径规划问题，就是要找到一条能够遍历室内环境的无碰撞地路径，这种路径规划的算法，满足以下的一些特点^[38]：

1. 最优性：机器人完成清扫的任务时，所用的时间、能量、重复率都是最小的，而覆盖率则是最大的。
2. 合理性：任何路径的行走都是合理的，或者是机器人能够遍历室内的任何空间，不留下盲区。
3. 适应性：在静态环境中算法能够解决所需要的问题，但是在复杂多变的环

境中，算法也能够随之改变，而不必要全部重新计算。

4. 约束性：在机器人整个运动的过程中，都满足运动的完整性和非完整性运动的约束。

5. 实时性：算法的复杂度能够满足机器人的运动需要。

6. 完备性：理论上存在一条能够遍历整个室内环境的无碰撞路径，算法一定能够找到；但是环境中没有可行的路径时，机器人的规划会失败。

3.2 路径规划技术

到现在为止，机器人的路径规划方法可以分为两种：基于任务的路径规划方法和基于行为的路径规划方法。

3.2.1 基于任务的规划方法

基于任务的路径规划方法就是强调对空间环境的描述，事先建立起室内环境的模型来进行路径规划。这种规划就是环境信息完全已知的全局路径规划，又称静态或离线路径规划。传统的全局路径规划包括：可视图法、切线图法、Voronoi 图法、栅格法，这几种方法都是基于图论的思想，在图中将目标、机器人和工作空间用一个连接图表示，机器人再寻找一条从起始点到目标点的路线。

1. 可视图

可视图法^[39] (Visibility Graph)最早是由 Wesley 和 Lozano 提出的,将机器人视为一点,把机器人的起点、终点和障碍物分别投影到平面上进行组合连接,这些组合连接的直线不穿越障碍物,这就是一张新构成的地图,称为可视图。如图 3.1 所示,

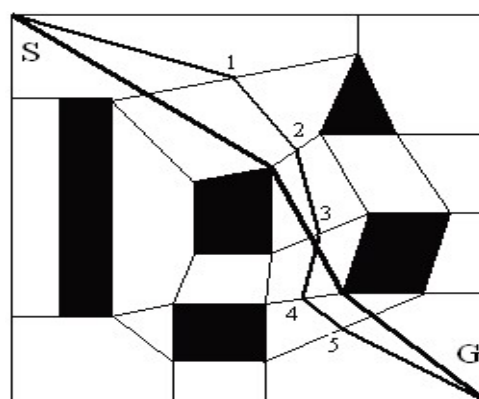


图 3.1 可视图

图 3.1 中的阴影部分表示障碍物的区域，空白的地方是机器人可行的区域，机器人假设为一点，在可视图图中运动。但是在应用时并不能将机器人视为一个点，因此可以将障碍物的尺寸适当的增加一点，使之达到平衡，这样才可使机器人视为一

点。然后机器人需要从起点 S 运动到终点 G ，则可视图可以表述为：分别给出两个集合：结点集合和弧集合，其中结点集合 $A = B \cup (s, g)$ ，式中的 B 代表了所有障碍物顶点的集合；而弧集合为 $K = \{(n_i, n_j) | n_i \in A, n_j \in A, i \neq j\}$ ，为第 i 和第 j 结点的线段与障碍物不相交。然后采用如 Dijkstra 算法来实现从起点 S 到终点 G 的最优路径。

2. 切线图

切线图同上面讲到的可视图相似，不同的只是节点集合和弧集合：结点集合不但包括了障碍物上的所有切点，还包括了机器人的起始点和终点；弧集合由两障碍物之间的公切线段和同一障碍物上的两切点之间的边缘线段组成。对于机器人来说，所走路径的最短距离就是顺着障碍物的边缘和他们之间的切线段所组成。因此，切线图在机器人的运动中具有一定的意义。高强^[40]在环境已知的条件下，讨论了各种障碍物的形状，采用切线图的方法来规划机器人的运动，使机器人搜索到最优的路径，如图 3.2 所示。



图 3.2 切点图

3. Voronoi 图

Voronoi 图最早是由俄国数学家 Voronoi 在 1908 年提出的，该图最初的应用在于平面点的临近问题研究^[41]。临近问题就是指在平面中给定 n 个点，然后以这些点为中心建立一个平面区域，在每个区域中的任何位置到该区域中心点的距离比到其它中心点的距离要近，如图 3.3 所示，图中是 $n=7$ 的情况。

图 3.3 是平面点集的 Voronoi 图，是 Voronoi 图最基本的形式，可以记为 VG (Voronoi graph)。如果将平面的点集扩展到几何体的集合，那么 Voronoi 图的概念就扩展到广义的 Voronoi 图 GVG (generalized Voronoi graph)。

设区域中的点 x 到一个障碍物子集 C_i 的距离 l 为

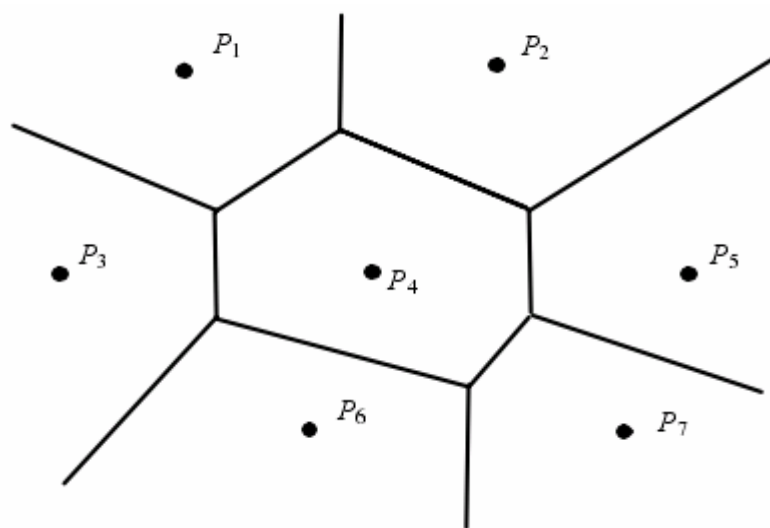


图 3.3 平面 Voronoi 图

$$l_i(x) = \min \|x, y\| \quad (y \in C_i) \quad (3.1)$$

障碍物的 Voronoi 域 V_i 是由到障碍物的距离最短的自由空间点所组成的集合，即

$$V_i = \{x \in F \mid l_i(x) \leq l_j(x), \forall i \neq j\} \quad (3.2)$$

上式 F 表示自由空间，GVG 是由到集合 C_i 和 C_j 距离相等的点所构成的，它到两个障碍物的距离相等，因此可以定义为二等距面，如下式所示：

$$D_{ij} = \{x \in F \mid l_i(x) = l_j(x), \forall i \neq j\} \quad (3.3)$$

从上可以知道，二等距面是由自由空间中距离相等的两个相邻的广义 Voronoi 域的边界，即 $D_{ij} = V_i \cap V_j$ ，所有二等距面就形成了广义 Voronoi 图 GVG。广义的 Voronoi 图则推广到空间中的实体对象，并在模式识别、机械加工、地理信息系统等领域得到了广泛的应用^[42]。由于机器人在二维的平面上工作，因此 GVG 和 VG 就为同一概念。

利用 Voronoi 图用于机器人的路径规划，重点在于 Voronoi 图的创建。许清松^[43]以障碍物的外接圆的圆心来作为障碍物的质心，并且以此来构造 Voronoi 图进行机器人的路径规划。这种方法所构造的 Voronoi 图没有考虑到障碍物的形状，所描绘的 Voronoi 图并不能很好的表达环境的信息，造成所构建的 Voronoi 图浪费了很多有效区域，因此这种方法的有效性较低。鉴于这种情况，作者温瑞^[44]提出了近似构造法来构造 Voronoi 图。近似构造法就是在各多边形、点或线段等边界上选择具有代表性的点，这些点称为母点，然后以这些母点来构造 Voronoi 图。母点的

数量可以根据需要，适当的增加或是减少来提高或降低构图的复杂度，不过要尽可能的减少可行区域被大量的占用，便于机器人尽可能方便地在空间区域中运动。

3.2.2 基于行为的路径规划方法

基于行为的路径规划方法是在完全未知或部分未知的环境中，利用传感器对机器人的工作空间进行搜索，以获取周围环境的信息，检测障碍物的位置、形状等，同时也实现机器人自身的定位，因此这种方法又称在线或动态路径规划。这种方法的行为框图如下

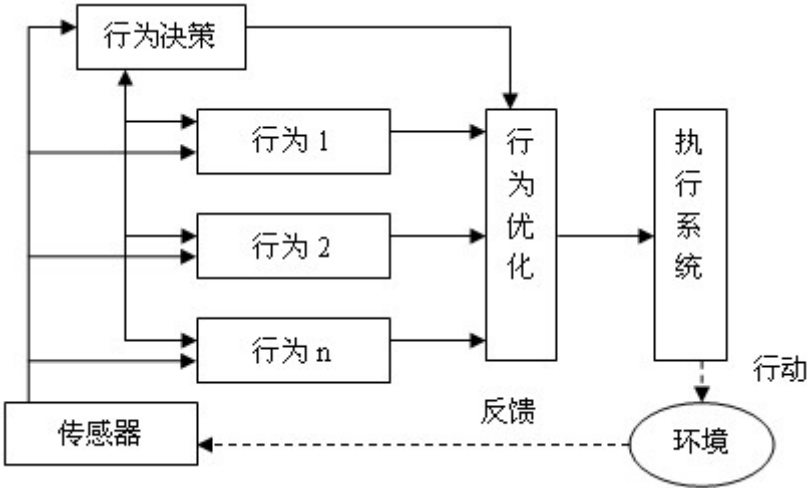


图 3.4 基于行为的方法框图

从上图我们不难看出，基于行为的机器人路径规划遵循着“感知—决策—控制”这样的步骤。首先，机器人通过传感器来感知周围的环境，为行为的决策过程提供相应的决策依据，然后根据行为决策计算出机器人需要的运动控制量，最后通过执行系统来控制机器人的运动。执行该步动作后，机器人通过传感器又不断地感知环境，如此反复的进行直到完成所规定的任务。机器人基于行为的路径规划方法有：人工势场法、占据栅格法和模糊逻辑算法。

1. 人工势场法

人工势场法^[45,464,47]最早是由 Khatib 提出的，它的基本方法是构造一个势场的数值函数来描述机器人工作空间的几何结构，通过感应势场的下降方向来完成机器人的运动规划。目标位置对机器人产生吸引力，而障碍物则对机器人产生排斥力，通过两者的相互叠加构成了机器人运动的总势场。在二维的平面空间下，可以视机器人为一个质点，而机器人在任意点的位置 $m=[x,y]^T$ 的运动方向就是由目标位置的吸引力和障碍物的排斥力所构成的合力所决定的， $m_z=[x_z,y_z]^T$ 为障碍物的位置。机器人的引力势为

$$U_{att}(m) = \frac{1}{2} \mu \rho_g^2(m) \quad (3.4)$$

其中, μ 正比例位置增益系数, m_g 代表机器人终点在空间中的位置, $\rho_g(m)$ 代表机器人同终点之间的欧几里得距离, 即

$$\rho_g(m) = \|m - m_g\| = \sqrt{(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2} \quad (3.5)$$

相对应的引力大小为

$$F_{att}(m) = -\nabla U_{att}(m) = -\mu \rho_g(m) n_g \quad (3.6)$$

而斥力势场函数为

$$U_{rep}(m) = \begin{cases} \frac{\sigma}{2} \left[\frac{1}{\rho(m)} - \frac{1}{\rho_o} \right]^2 & \rho(m) \leq \rho_o \\ 0 & \rho(m) > \rho_o \end{cases} \quad (3.7)$$

其中, σ 代表位置增益系数, ρ_o 为障碍物的影响距离, $\rho(m)$ 为机器人同障碍物之间的欧几里得距离, 即

$$\rho(m) = \|m - m_z\| = \sqrt{(x - x_z)^2 + (y - y_z)^2} \quad (3.8)$$

相应的斥力大小为

$$F_{rep}(m) = -\nabla U_{rep}(m) = \begin{cases} \frac{n_o \sigma}{\rho^2(m)} \left[\frac{1}{\rho(m)} - \frac{1}{\rho_o} \right] & \rho(m) \leq \rho_o \\ 0 & \rho(m) > \rho_o \end{cases} \quad (3.9)$$

机器人所受的合理为引力和斥力的和:

$$F(m) = -\nabla U(m) = F_{att}(m) + F_{rep}(m) \quad (3.10)$$

利用上面的方法来进行机器人的路径规划计算简单, 实时性强, 便于数学描述。但是这种方法也存在一些局限性。在实际环境的应用中, 机器人经常会陷入局部极小点而无法达到终点, 鉴于这种情况, 不同的文献中对局限性都提出了相应的改进措施。作者刘春阳^[48]通过改进斥力函数, 而保持引力函数不变, 来增加安全距离并将障碍物的影响距离设置成一个动态值, 而针对机器人的局部极小的问题, 则利用虚拟障碍物的概念能够有效解决, 改进后的斥力函数如下

$$F_{rep} = \begin{cases} 0 & d_1 > \rho_o \text{ 或 } d_1 > r \\ k_1 r l (\pi - \theta) [1/(d_1 - \rho)^n - 1/(\rho_o - \rho)^n] / \sigma & d_1 \leq \rho_o \text{ 且 } d_1 \leq r \text{ 且 } l \leq \sigma \\ k_1 r (\pi - \theta) [1/(d_1 - \rho)^n - 1/(\rho_o - \rho)^n] & d_1 \leq \rho_o \text{ 且 } d_1 \leq r \text{ 且 } l > \sigma \end{cases} \quad (3.11)$$

式中, ρ 为机器人的安全距离, d_1 为机器人到障碍物的最短距离, l 代表终点到障碍

物之间的距离， r 代表机器人到终点的距离。改进后的斥力函数再同最小安全距离、障碍物的动态影响距离和虚拟障碍等方法能够使机器人成功地避开障碍物，完成相应的任务。

针对于算法本身的缺点，作者罗胜华^[49]提出与上面不同的处理方案，作者改变的是斥力场函数，改变的函数如下

$$U_{rep}(m) = \begin{cases} \frac{\rho_g k_{rep}}{2} \left[\frac{1}{\rho(m)} - \frac{1}{\rho_o} \right]^2 & \rho(m) \leq \rho_o \\ 0 & \rho(m) > \rho_o \end{cases} \quad (3.12)$$

这主要针对目标点附有障碍物时的情况，避免机器人接近目标点时，在障碍物的斥力作用下干扰机器人的运动，使其无法到达目标。而通过改进斥力场函数，当机器人运动到接近目标时，使斥力场接近于 0。当 $X = X_g$ 时，目标点就成为整个势场的最小值。而对于机器人的极小点问题，则采用了增量项的方法使得机器人摆脱障碍物进而顺利到达终点。

2. 占据栅格法

虽然栅格法最早是由 W.E.Howden 在 1968 年提出的，但是我们现在所用的占据栅格是由 Moravec 和 Elfes 所提出来的^[50]，该方法是以栅格为单位来表示机器人工作环境的，环境划分成一个个大小一样并且具有一定分辨率的栅格，对障碍物在图中的分辨显示比较清晰和能够很好的保留整个环境的各种信息，避免了一些复杂的计算。鉴于这种优点，近年来对这种方法的研究越来越普遍。

设所要清扫的室内环境的长为 l ，宽为 w ，机器人的长和宽为 d ，栅格的大小和机器人的大小尺寸一样，则可以计算出所要清扫的栅格的数目为 lw/d^2 。环境是由一些单元格或栅格所构成，栅格用 $grid[i][j]$ 来表示的，其中的每个栅格 $grid[i][j]$ 包含了该栅格被占据可能性的概率值或者可信度，以及该栅格没有被占据可能性的概率值或者可信度。这些栅格用如下的函数来表示

$$f : w \rightarrow \{0,1\} \quad (3.13)$$

当 $f(x)=1$ 时，表示该栅格被障碍物所占据；当 $f(x)=0$ 时，表示该栅格是自由的区域，即没有被栅格所占据。整个空间区域用一个二进制方阵来表示，也就是等价为一个二维的数组，只不过该数组是由 0 和 1 来表示的^[51]。栅格图如 3.5 所示。

图 3.5 中的黑色代表障碍物区域，白色代表机器人的自由区域。从上图可以看出，栅格地图可以很好描述环境的信息，障碍物区域和自由区域可以清楚地显示出来，各种算法都能够在此基础上规划机器人的运动。因此，此方法特别适合

于机器人在空间环境中的路径规划。

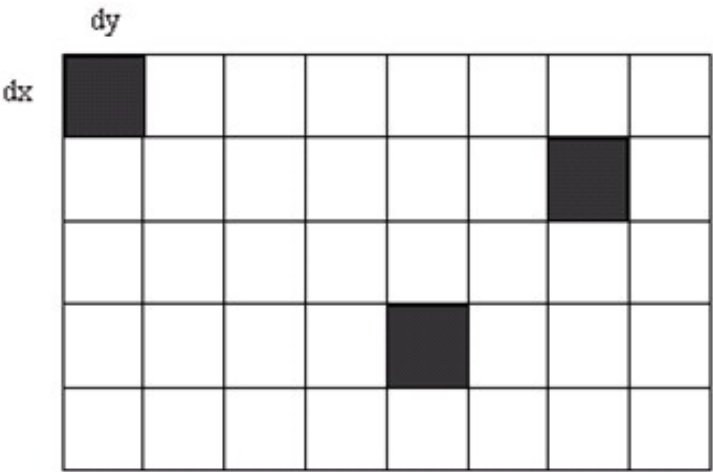


图 3.5 栅格模型地图

作者刘奎^[52]对环境进行栅格建模，以每个栅格的中心来表征一个特征点，并对环境进行矩形建模，然后机器人搜索每一个基点所对应的矩形区域，最终完成遍历。该栅格模型是由机器人的“沿边”学习所得到的，机器人围绕环境行走一圈，确定环境的轮廓，根据环境的长和宽，计算出每个栅格的数目和与此对应的环境中的基点。距形化建模就是在栅格地图建好的基础上，将障碍物附近的栅格适当放大而得到的，具体的放大的尺寸由机器人沿边学习后测得的数据所决定，而且每个矩形只对应着一个基点。

3.3 本章小结

本章在引言中对移动机器人和清扫机器人的路径规划作了比较，它们是“面”和“线”的关系，一个优良算法须具有最优性、实时性、约束性等特性。移动机器人路径规划分为基于任务的规划方法和基于行为的路径规划方法。基于任务的规划方法又有可视图法、切线图法、Voronoi 图法等；而基于行为的路径规划方法又分为人工势场法和占据栅格法等，本章对上面几种方法的特点进行了分析和讨论。

4. 室内清扫机器人的路径规划算法研究

清扫机器人的全局路径规划，是基于图论的全局路径规划。这种方法包括两个阶段：第一阶段是构造一个用以描述环境的关系图，基于上文的分析，本文将采用栅格图来建立环境模型，栅格图能够为机器人的空间感知和导航中的许多问题提供一个统一的解决方案，具有许多的优点：

1. 栅格地图直观、简单，能够准确地表示室内环境；
2. 栅格地图为机器人的导航、壁障、路径规划和定位提供了基础；
3. 栅格地图对不确定的信息作了描述，有利于多传感器信息的融合，便于机器人更精确地建图和定位；

相对于上面提到的几种方法，栅格法相对而言更简单，在路径规划中更能发挥出它的优势。因此，在这几年的发展中，栅格法在机器人的运动中显得越来越常见，越来越重要。

第二阶段是按照一定的准则如最短距离、时间最少等寻找一条最优的路径，本文采用回溯法来遍历室内的环境。

4.1 全局路径规划算法

清扫机器人的运动方式有多种，但是总结起来，大体的全局区域的路径规划方式有螺旋式的路径规划、随机式路径规划和犁田式的路径规划三种。

4.1.1 螺旋式规划

螺旋式的路径规划是机器人先在室内房间的某一角落按照螺旋式“回”字的方式行走，逐次递减机器人的清扫半径，最后机器人停在清扫区域的中间,具体如图4.1所示，图中直线代表机器人的运动路径，箭头代表机器人的运动方向。

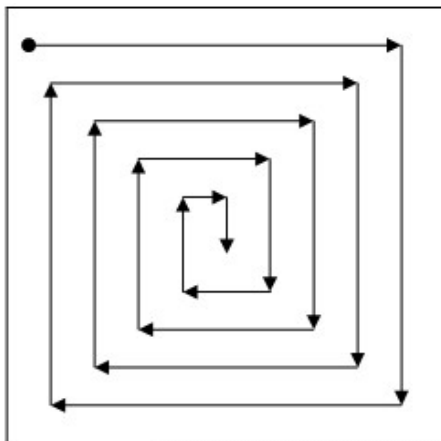


图 4.1 螺旋式的路径规划

在简单障碍物的环境中，该方法能够很好完成清扫机器人遍历的清扫工作，清扫的效率也高。但是在复杂的环境中，用该方法来规划路径，则不容易实现遍历的路径工作。

4.1.2 随机式规划

随机式的路径规划是机器人从某一点出发后按照某种行走的方式，如直线或者是曲线，随机的在空间环境中清扫，如图 4.2 所示。清扫机器人从环境中的一个角落开始出发，按照某一路径随机地在空间中清扫，图中机器人先是直线行走，碰到障碍物后是按照曲线的路线来避开障碍物，并且在环境中随机清扫，直到遍历环境中的每个空间。

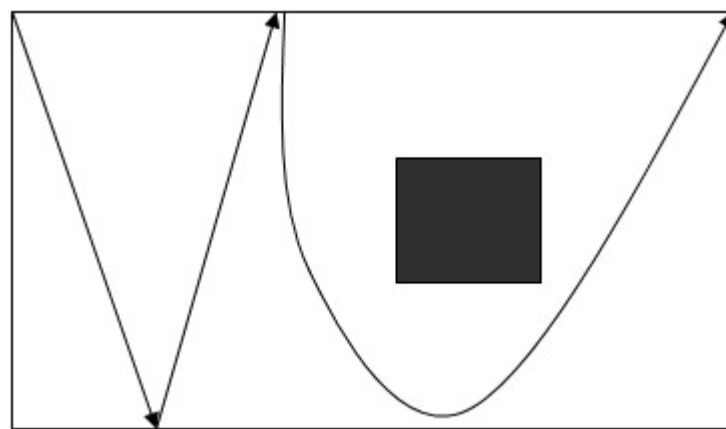


图 4.2 随机式的路径规划

这种随机式的路径规划，算法实现起来比较简单，容易控制。但是清扫机器人的路径规划有两个准则：要求清扫机器人能够实现最大的覆盖率和最小的重复率。显然这种方法不能实现这两点，随机式的路径规划重复太大，将造成时间和资源的浪费。

4.1.3 犁田式规划

犁田式的路径规划是指机器人从起点开始沿着墙壁行走，碰到障碍物转弯时，旋转 90° 往前走一个机器人的身位，再转 90° 往前行走，按照此方法反复的在空间中行走，直到完成相应的任务。犁田式的路径规划如图 4.3 所示。

犁田式的路径规划是往复式前进，在室内环境中，由于房间或是机器人本身的尺寸问题，房间的大小可能不是机器人大小的整数倍，因此，清扫的时候可能会产生“边缘效应”，即机器人在结束覆盖的那一条矩形边缘地带会留下宽度小于机器人本体宽度的一条未覆盖地带。但是考虑到清扫机器人自身的尺寸相对较小，因此“边缘效应”不会存在，即使存在也是靠近墙壁的很小的面积，不会影响整体的覆盖效果。

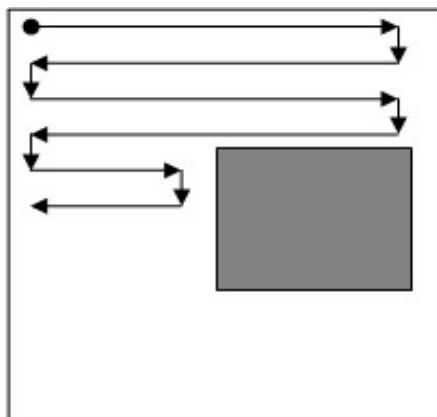


图 4.3 犁田式的路径固化

螺旋式的路径规划和犁田式的路径规划，这两种方法较适合机器人室内环境的路径规划。如果房间的大小是机器人大小的整数倍的话，那么它们路径总长度是一样的，也就是机器人在这两中规划方式上的行走的路程是一样的。但是考虑到室内环境的复杂性，里面的障碍物如桌子、凳子、沙发还有床等，这些相对于螺旋式的路径规划来说比较难控制；而采用犁田式的路径规划相对来说比较容易实现，效率高和耗能少，还能够完成遍历室内环境的任务。

4.1.4 回溯算法的一般描述

能够用于清扫机器人的路径规划的算法很多，有贪心算法、Dijkstra 算法或 A^* 算法，此外还有很多算法可以应用至栅格图的搜索过程，其中有概率论方法、遗传算法和蚁群算法等，这些方法都是路径寻优常用的方法，本文将采用回溯法来进行机器人的路径的搜索。回溯法又被称为试探法，它的基本思想是根据深度优先来进行问题的搜索，这种算法是一种能够避免不必要重复搜索的穷举式搜索算法。当算法搜索到某一步时，如果发现上一步的选择不是最优或是达不到所设定的目标时，就选择退回前一步继续搜索，这种选择的不是最优的就往回搜索的技术称为回溯法。

设所需求解的问题为 Q ，用回溯法来解决一般可以描述为：状态空间 $F = \{(a_1, a_2, \dots, a_n) | a_i \in C_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 由 n 元组 (a_1, a_2, \dots, a_n) 组成，约束集 H 是一个由给定 n 元组中的一个分量，状态空间 F 中满足约束集 H 的所有 n 元组全部约束条件。可以知道 C_i 是 a_i 的定义域，而且 $|C_i|$ 是有限的， $i = 1, 2, \dots, n$ 。因此我们可以认为 F 中满足约束集 H 的全部约束条件的任何 n 元组就为问题 Q 的一个解。

要解决问题 Q 的比较简单的方法是枚举法，就是对状态空间 F 中所有的元组一个个地对比是否满足约束集 H 的全部约束。如果满足这种约束，就是 Q 的一个解。但是这种完全检测的方法的计算量太大。不能满足现实中的要求，因此要用回溯法来解决。在回溯法中有三个重要的概念：

1. 约束函数：约束函数是上面提到的约束集 H ，根据题意的描述除去那些不

符合要求的解, 这样可以使算法避免不必要的搜索这些不符合要求解的过程。因此对任何状态空间树上的节点约束函数都是有效的和等价的。

我们知道, 约束集 H 是具有完备特性的, 如果 i 元组 (a_1, a_2, \dots, a_i) 中满足约束集 H 时只涉及到 a_1, a_2, \dots, a_i 的所有约束, $i=1, 2, \dots, n$, 那么 $j(j < i)$ 时的 (a_1, a_2, \dots, a_j) 元组也一定满足约束集 H 中只涉及到 a_1, a_2, \dots, a_j 的所有约束。这就是说, 当 $0 \leq j \leq n-1$ 时, j 元组 (a_1, a_2, \dots, a_j) 不满足约束集 H 中只涉及到 a_1, a_2, \dots, a_j 的约束时, 那么任何 n 元组 $(a_1, a_2, \dots, a_j, a_{j+1}, \dots, a_n)$ 中也一定不满足约束集 H 中只涉及到 a_1, a_2, \dots, a_i 的一个约束, $j \leq i \leq n$ 。因此对于具有完备性的这类问题, 如果可以判断某个 T 元组 (a_1, a_2, \dots, a_j) 不满足约束集 H 中只涉及 a_1, a_2, \dots, a_j 的一个约束, 那么就可以断定, 包含 (a_1, a_2, \dots, a_j) 的任何 n 元组都不是所求问题的解, 因此, 算法执行的时候就不必去搜索它们, 提高算法的执行效率。

针对这类问题, 回溯法上面的性质可以得出的速度较快和效率更高, 因此上面的方法就不用枚举法来解决, 直接用回溯法就能够得到满意的效果, 不需要一个一个的比较, 可以为算法节省更多的时间。

2. 状态空间树: 状态空间树是用一个树形结构的图形来对所有解的描述, 这种树是一棵带权有序树 T , 它的高可表述为 n , 因此问题 Q 的所有解在状态空间 F 中的搜索就可以转化为在树 T 中搜索, 通过检索来搜寻问题 Q 的解, 树 T 是这样来创建的:

假设 i 个元素排成 $a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, \dots, a_i^{(k_i-1)}$, C_i 是 a_i 的定义域, 且 $|C_i| = k_i, i=1, 2, \dots, n$ 。从根节点开始, 设树 T 的某一层的每一个父结点都有 k_i 个子节点, 这 k_i 个子节点到它们的父节点边, 从左到右分别带权 $a_{i+1}^{(1)}, a_{i+2}^{(2)}, \dots, a_{i+1}^{(k_i)}$, $i=1, 2, \dots, n-1$ 。照此方法, 状态空间 F 中的一个 n 元组 (a_1, a_2, \dots, a_n) 和树 T 中的一个叶子结点相互对应, 因此, 树 T 的根到这个叶子结点上的 n 条边的权分别为 a_1, a_2, \dots, a_n 。另外, 当 $0 \leq i \leq n-1$ 时, 状态空间 F 中的 n 元组 (a_1, a_2, \dots, a_n) 的一个前缀 i 元组 (a_1, a_2, \dots, a_i) 和树 T 中的一个非叶子结点相互对应, 树 T 的根到这个非叶子结点上的权分别为 a_1, a_2, \dots, a_i , 反之也亦然。当然, 状态空间 F 中的任意一个 n 元组的空前缀和树 T 的根相对应。

3. 扩展节点、活节点、死节点: 简单的说, 扩展节点就是求出子节点的节点, 在深度优先的搜索中, 扩展节点只允许有一个; 死结点就是当前节点和其父节点都满足约束函数 H 要求的节点, 因此可以知道死结点是不必要求出其子节点的。活节点则刚刚与此相反。

在树 T 中搜索问题 Q 的一个解, 则要从树 T 的根到子结点上的 n 个权 a_1, a_2, \dots, a_n 都满足 H 的全部约束。在树 T 中搜索满足要求的全部子结点, 则要从根

节点出发，按深度优先的方法逐步地往前搜索，即在 n 元组中逐次的搜索满足约束条件 H 的前缀 1 元组 (a_1) 、前缀 2 元组 (a_1, a_2) 、...，前缀 i 元组 (a_1, a_2, \dots, a_i) ，...，直到搜索到 $i = n$ 为止。

4.1.5 回溯法的搜索过程

如果问题 Q 满足约束集 H 及其相应的树 T ，由于树的层次性和约束集 H 的完备性，回溯法在树 T 中搜索 Q 的全部解能够这样描述：

从树 T 的根节点开始，按照深度优先的搜索方法，系统的搜索满足约束函数的所有状态节点，这个搜索就是“激活”所有满足约束函数的子节点。而对于不满足约束函数的所有子节点算法则不去搜索，而是返回先前的状态节点来实现回溯，先前的状态节点由于已经被搜索过，则已经被作上标记，因此，算法返回到先前做过标记的节点然后继续搜索，直到回溯到的状态节点是没有被搜索过的，然后又按照满足约束函数继续搜索，如此反复进行，直到搜索到所有的满足问题 Q 的解。

如果算法在搜索状态节点的过程中，所激活的状态结点满足了终结条件，则应该把结果保存或是输出。因为利用回溯法求解问题 Q 时，要求出问题 Q 的所有解。因此在搜索得到某一子结点后，也不能停止搜索，要继续往前回溯，以便得到问题的所有解。直到树 T 的所有节点有都被搜索过，算法才停止。

4.2 回溯法在清扫机器人路径规划中的应用

回溯法用于机器人的路径规划，首先是建立室内环境的模型，本文采用的是栅格模型，然后按照回溯法的要求来进行机器人的路径规划，回溯法是采用机器人行走优先级来判断机器人的行走方向的。

首先，算法假设机器人放在房间的一个角落里，如图 4.4(a)所示，机器人放在房间的左上角，在这个位置机器人可以有两个方向可以行走，一个是往下行走，一个是往右行走，图中的机器人是往右行走，当机器人碰到墙壁时，则机器人就往下行走一个自身的身位往回继续行走，这就是一个往复行走的顺序，如图 4.4(b)所示。

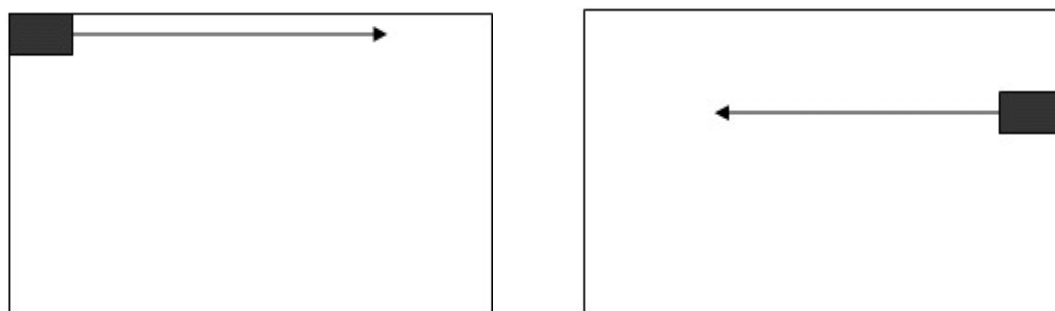


图 4.4 (a) 机器人的起点位置，(b) 碰到墙壁后的运动路径

如果机器人在没有障碍物的室内环境中运动的话，那么它的运动路径就是一个传统

的往复型的路径规划，按照上面的运动方式，一次移动一个机器人的身位，如此的往前移动，直到遍历整个环境，遍历的路径如图 4.5 所示。

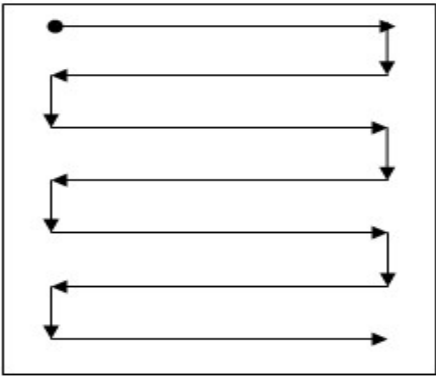


图 4.5 无障碍物的路径规划

机器人就是以这种往复行走的方式在空间中行走，当在有障碍物的环境中时，如 4.6(a)所示，当机器人运动到障碍物的 A 点时，下一步机器人的运动方向是按照原路径往前走，还是绕过 A 点向 B 点运动？采用回溯法运用于机器人的路径规划，将机器人的运动方向按照一个行走的优先级来判断，机器人的运动方向就有了一个行走的顺序，因此机器人在 A 点时，机器人并不会按照原来运动路径向右继续行走，而会在 A 点旋转 90° 向 B 点运动。运动的路径如 4.6(b)所示。对应于上面机器人碰到障碍物的情况，它们的运动路径如 4.6(c)和(d)所示

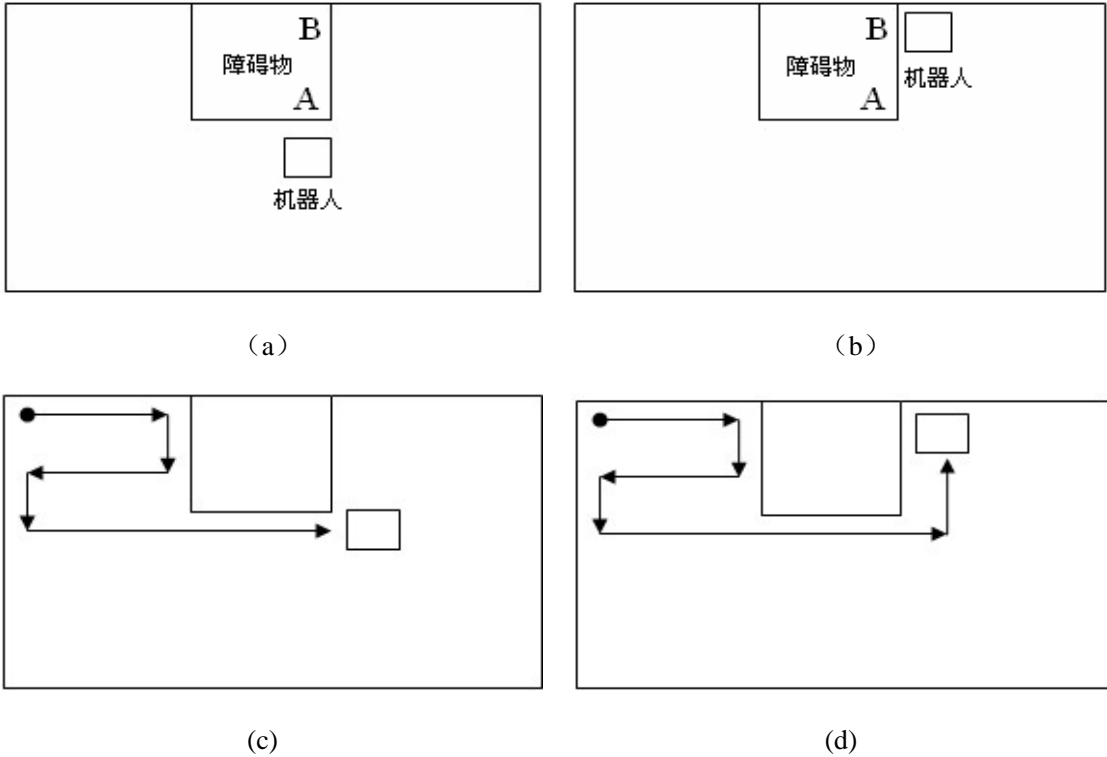


图 4.6 (a)机器人运动到 A 点,(b)机器人旋转 90° 运动到 B 点, (c) 对应于 a 的路径规划, (d) 对应于 b 的路径规划

室内环境的障碍物错综复杂,有靠近墙壁的障碍物,也有在环境中间的障碍物,如桌子、茶几等,具体的如图 4.7 所示。根据回溯法的行走优先级的判断,机器人在图 4.7(A)点并不往下走到 B 点,而是机器人继续往左行走,直到碰到墙壁,然后往复前进,当机器人通过 B 点,运动到 C 点时,按照上面所讲的,机器人将向上运动到 D 点,在 D 点时,机器人将做一个判断,机器人将顺时针旋转 90° ,然后向右运动,因为在 D 点的上方机器人已经清扫过,并且机器人在清扫过的地方已经做了一个标记。因此,以后机器人检测此标记将不会对此方格进行清扫,所以在 D 点机器人将向右运动。

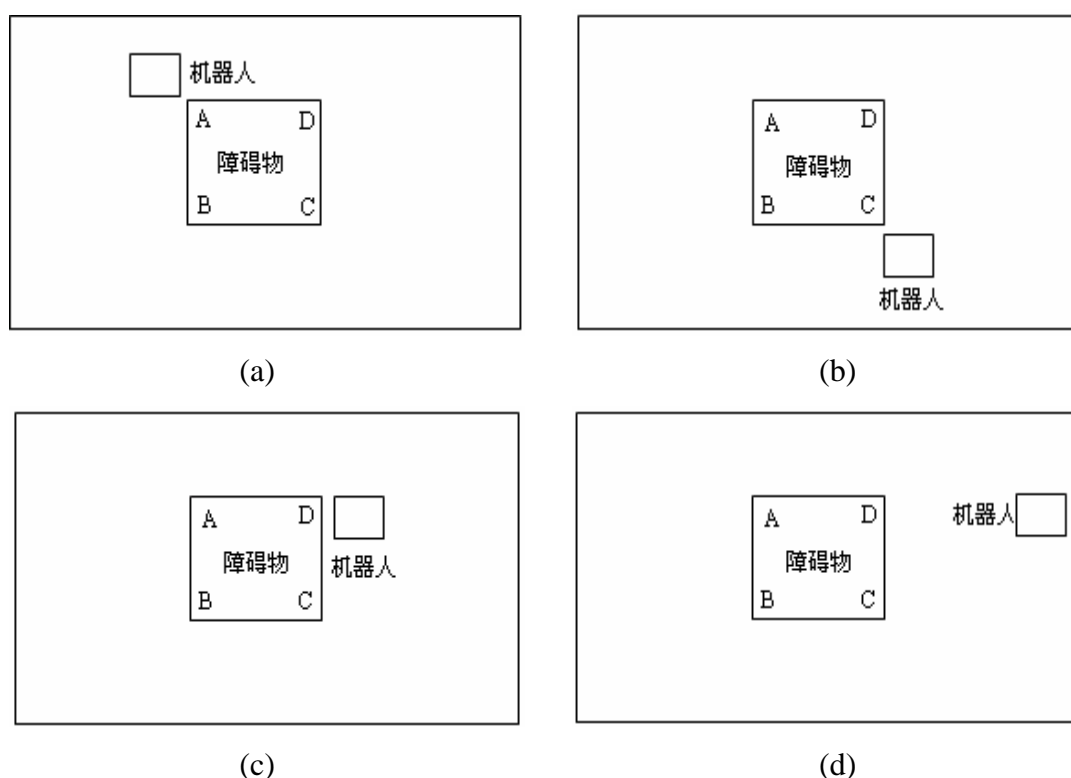


图 4.7 机器人在房间中间碰到障碍物的情况

上面给出了机器人在遇到凸障碍物的路径规划算法,当室内环境除了凸的障碍外,还有一些复杂的障碍物,如凹(U)型障碍物,如图 4.8 所示,机器人的行走路径按照障碍物的摆设的方向不同,运动的方向也不同。有的相对比较简单,图 4.8 就是简单的一种,但是还有一种较复杂,机器人需要回溯才能够走出这种障碍。机器人在图 4.8 中运动时,按照往复运动来遍历环境,运动到 A 点时,按照上面的说明,机器人将到 U 型障碍物里面去清扫,当清扫完时,运动到 B 点,再按照往复运动继续后面的清扫。

当碰到复杂的障碍物时,按照回溯法的要求,机器人就得采用回溯的方法才能够避开这种障碍物。如图 4.9 所示,就是一个需要用回溯法来避开的一个障碍物。当机器人进入到 1 栅格时,从图中不难看出,1 栅格只与 2 栅格相连,因此机器人

在栅格 1 时下一步将进入栅格 2，但是机器人进入 2 栅格时，将无路可走，因为栅格 2 的周围都是障碍物，因此，机器人就进入了所谓的死角，在这种情况下，机器人将采用回溯来摆脱这种困境，回溯就是使机器人回到上一个状态，这里就是回到栅格 1，由于栅格 1 机器人已经走过，之前就给栅格 1 做了一个标记，标记使用 flag 来表示，机器人每走一个栅格，标记 flag 就加 1，回到栅格 1 之后，由于机器人还陷于死角，因此，机器人还需要回溯直到发现没有走过的栅格。

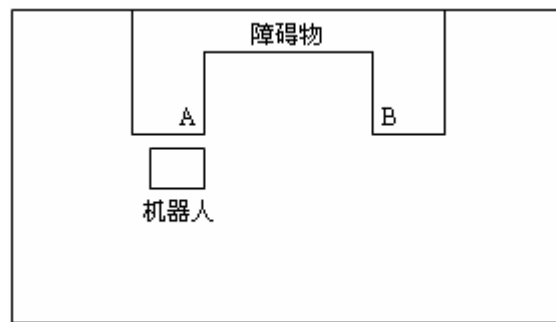


图 4.8 简单 U 型障碍物

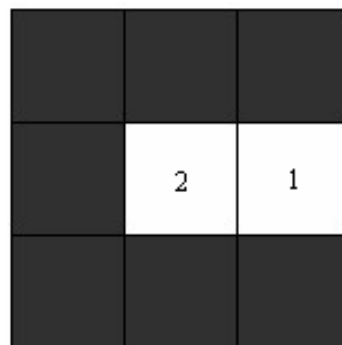


图 4.9 机器人回溯

具体的回溯法的算法步骤如下：

1. 初始化算法；
2. 根据室内环境的障碍物的分布情况，生成一个栅格地图，栅格地图中表示了障碍物和自由区域的分布，规定了机器人的运动范围；
3. 设定机器人的开始节点的位置，一般机器人都是放在室内环境的一个墙角处，然后在此处开始清扫，如果清扫结束则转 7。
4. 机器人按照回溯法的要求来进行栅格路径的判断，即机器人按照栅格地图的左边、上边、右边和下边作为四个行走优先级的方向，按此方向来进行路径的搜索；如果清扫完毕，则转 7；
5. 判断机器人是否陷于困境？如陷于困境则采用回溯使机器人摆脱困境，否则机器人继续搜索，转 4；
6. 判断栅格地图是否清扫完毕，如果是则转 7，否则转 4，如果需要回溯则转 5；

7. 算法结束;

4.3 算法框图

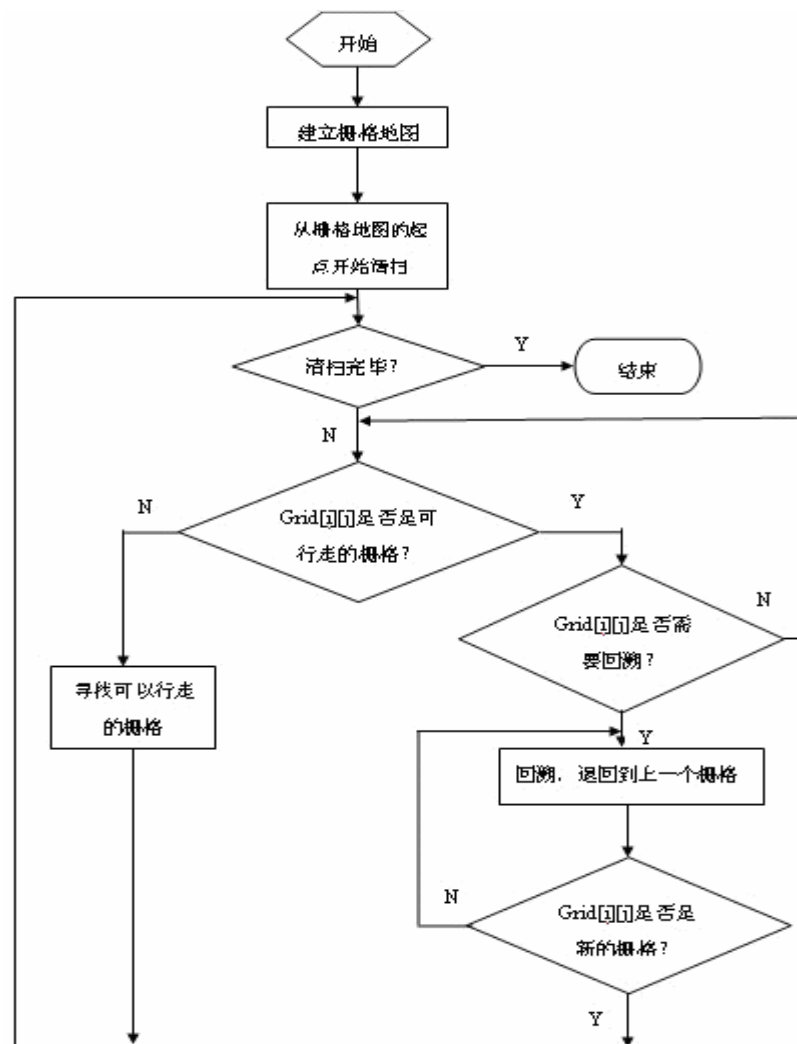


图 4.10 算法框图

4.4 本章小结

本章讨论了清扫机器人运动的三种方式：螺旋形、随机形和犁田式，螺旋式和犁田式方法较适合机器人室内环境的路径规划。考虑到室内环境的特殊性，采用犁田式的路径规划比较容易实现，效率高、能耗少，能够完成遍历室内环境的任务。给出了回溯法的基本理论，研究了基于回溯法的清扫机器人路径规划算法，并设计了将回溯法应用于清扫机器人路径规划的实现方法的步骤。

5. 室内清扫机器人路径规划实验研究

清扫机器人路径规划实验是通过计算机路径规划仿真和 AS-R 机器人路径规划实现进行的。

5.1 路径规划算法的计算机仿真

清扫机器人的路径规划算法是在 Visual C++6.0 软件上实现的,通过上章算法的阐述和算法框图的分析,本章通过仿真软件加以实现。本次实验在 VC++文档上来实现,具体的界面如下图所示

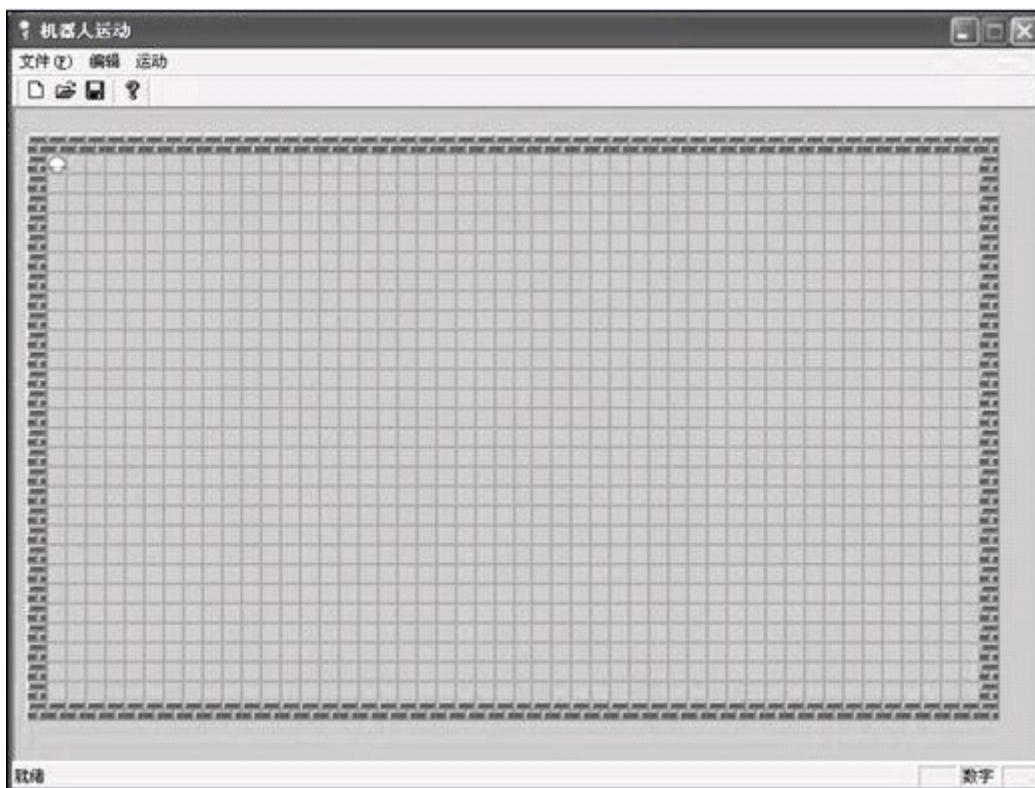
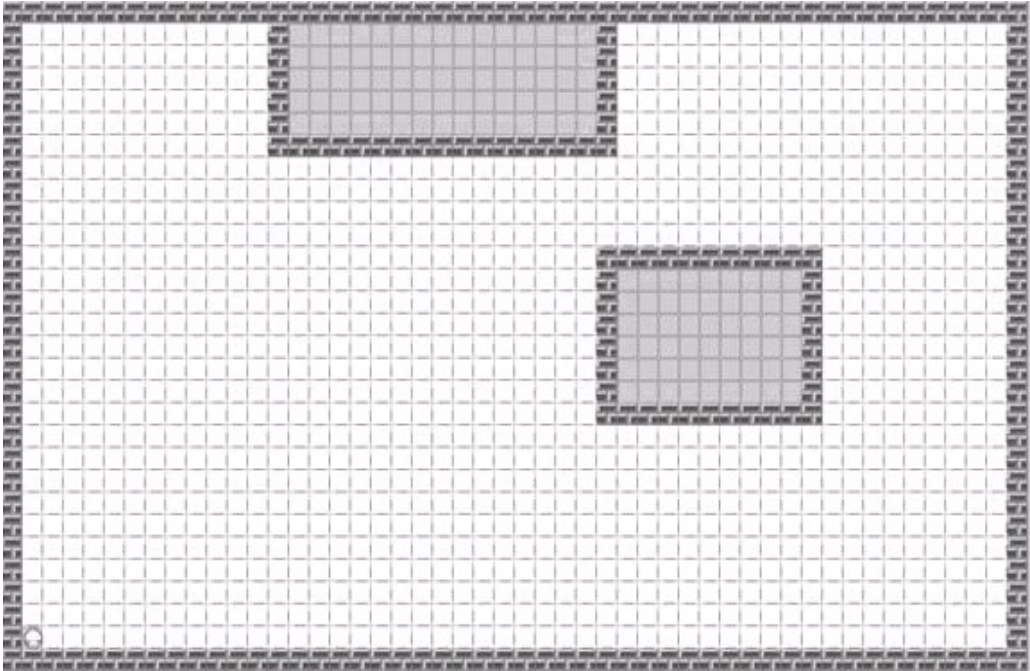


图 5.1 机器人仿真界面

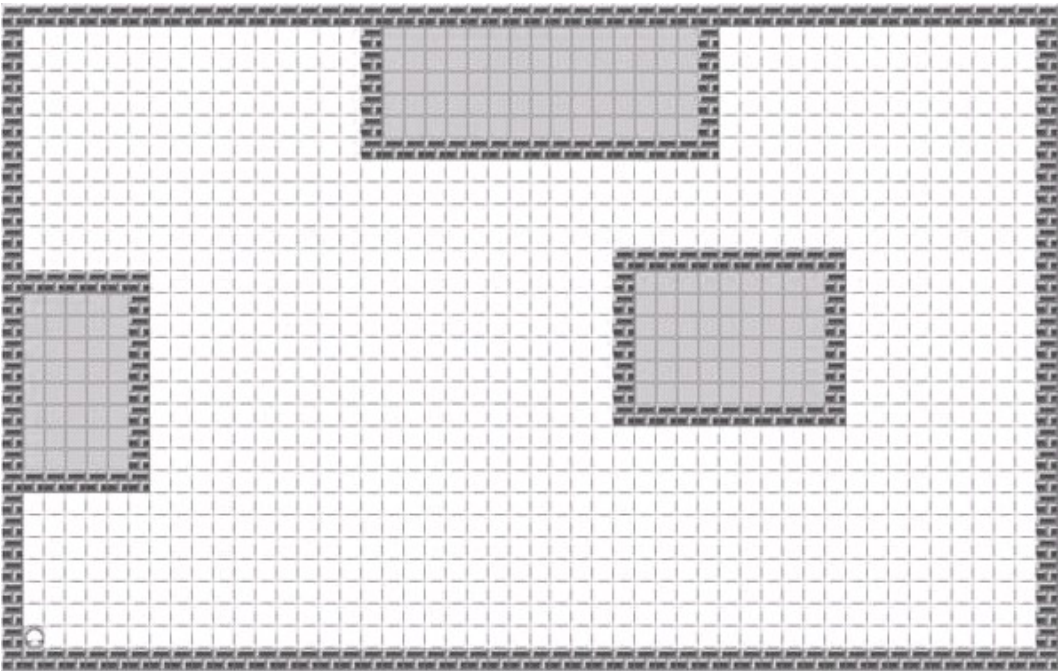
按照上图中的界面所示,清扫机器人是在一个 50*30 的栅格环境中进行模拟,图中清扫机器人的清扫环境用障碍物相围,用以模拟室内环境的墙壁,中间的空白区域就是机器人的运动区域。开始时,机器人放在环境的左上角,如上图所示。

为观察机器人的覆盖范围和清扫的效率,首先将机器人置于一个障碍物摆放相对比较简单的环境中,通过机器人的运动来观察路径规划的效果。图 5.2 是机器人的运行环境,图 (a) 中只有两个障碍物:一个是靠近墙角的障碍,用来模仿现实环境中的沙发等靠墙的物体;另一个是在环境中间的障碍,是模仿现实环境的书桌等物体。图中的空白区域就是机器人需清扫的区域,图 (b) 中有三个障碍物,两

个靠墙的和在一个中间的障碍物。机器人路径规划的具体运动路线如图 5.3 所示，从(a)、(b)两图中可以明显看出，机器人能够遍历室内的环境，图中并没有留下所谓的死角、盲区等机器人容易碰到的问题。因此在这样的环境中，运用回溯算法，机器人能够很好的遍历室内环境，覆盖的效率很高和重复率很低，达到了清扫机器人路径规划的两个要求。



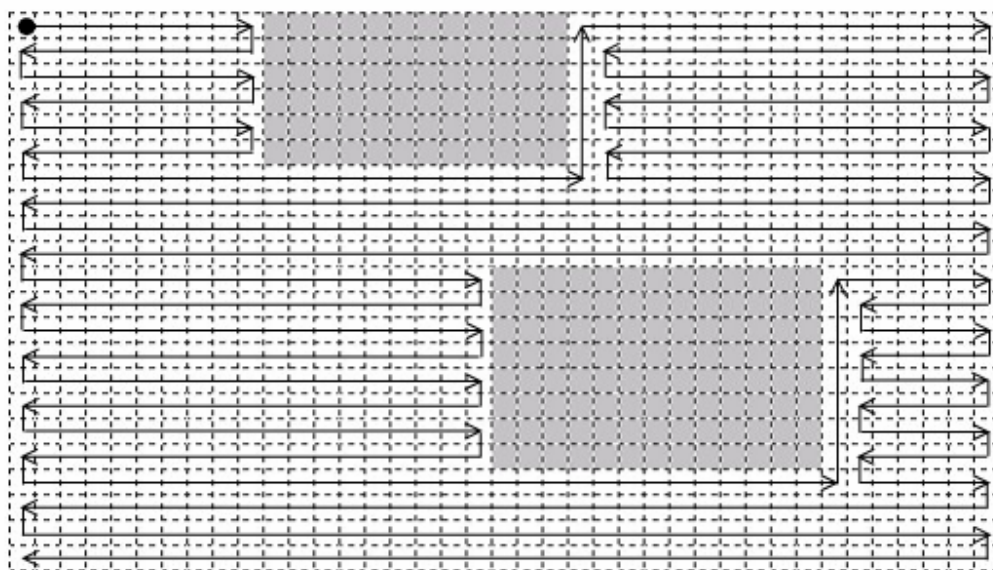
(a)



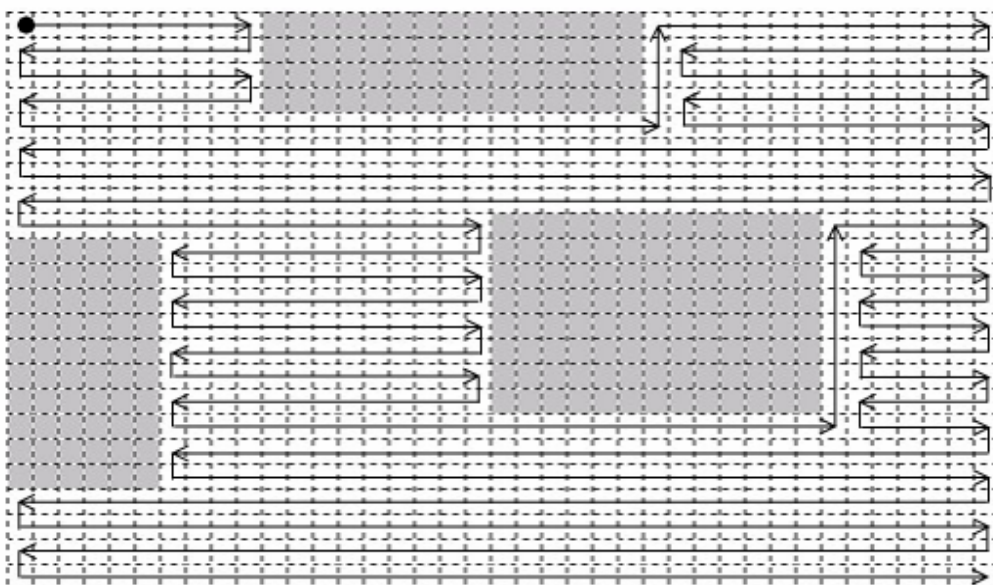
(b)

图 5.2 清扫机器人的运行环境

(a)有两个障碍物的运行环境，(b)有三个障碍物的运行环境



(a)



(b)

图 5.3 清扫机器人的运动路径

(a) 机器人在两个障碍环境中的运动路径 (b) 机器人在三个障碍环境中的运动路径

从以上的机器人路径规划的路线可以看出，清扫机器人在在这种简单的障碍环境中能够很好的完成清扫任务，并且满足清扫机器人的最大覆盖率和最小重复率这两个条件。通过设置室内的障碍物摆设的情况，来重新测试清扫机器人的路径规划情况，室内清扫环境如图 5.4 所示。

机器人路径规划的仿真结果如图 5.5 所示，不难从图 5.5 中看出，在重新摆设后的室内环境中，机器人还是能够顺利的完成清扫的路径规划任务。

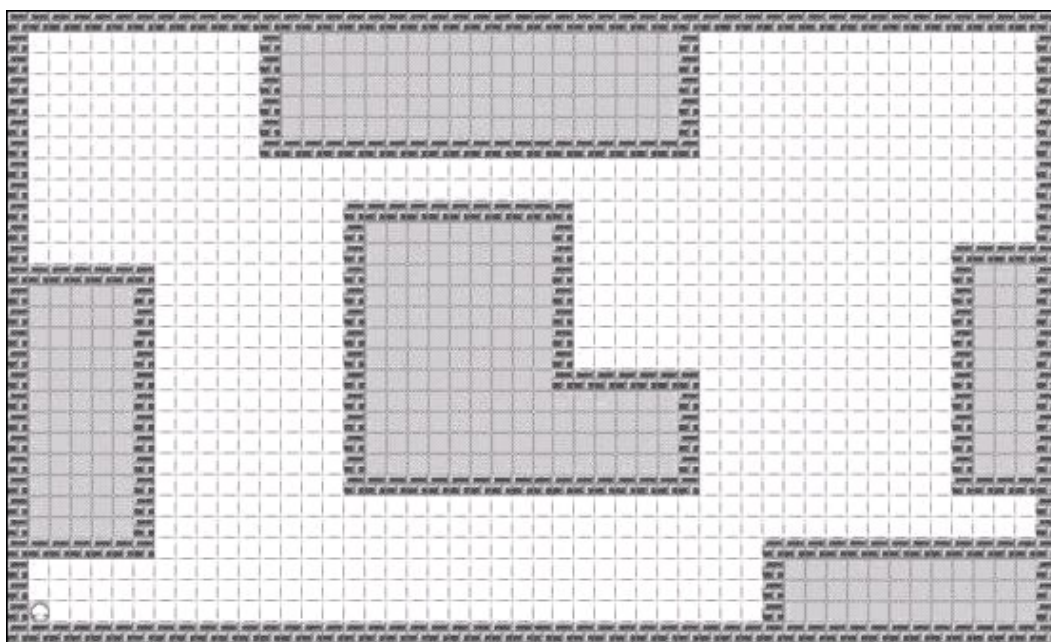


图 5.4 有多个障碍物的运行环境

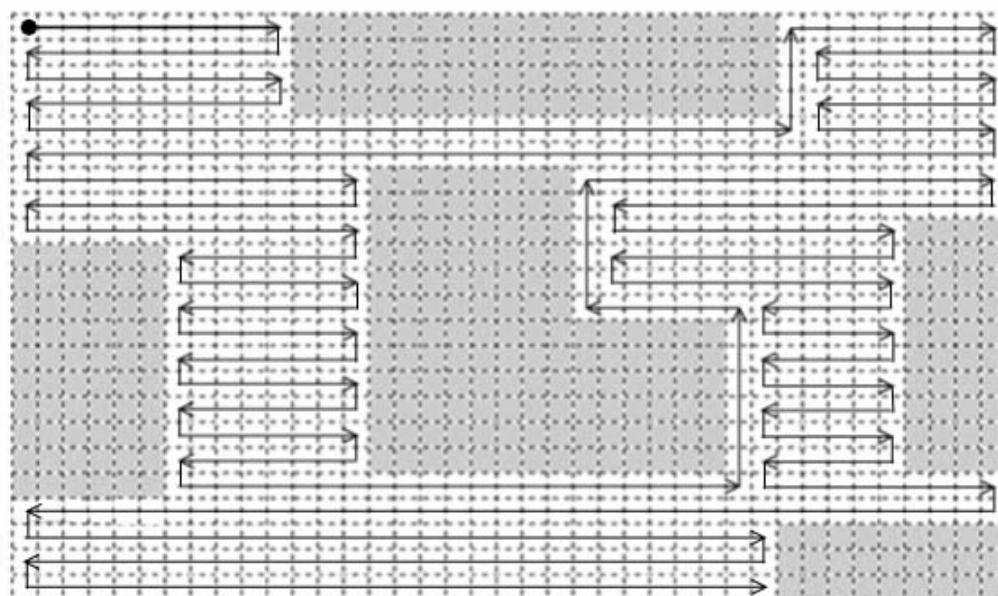


图 5.5 清扫机器人在多个障碍物环境中的运动路径

从清扫机器人的运动路径可以看出，在障碍物较多的环境中清扫机器人能够完成清扫任务，并且机器人重复的路径较少，达到了清扫机器人的覆盖率最大和重复率最小的要求。

上面机器人是在相对简单障碍环境中的路径规划，机器人能够很好的完成相应的任务。但是在复杂的环境中，如在有 U 型障碍物的环境(如图 5.6 所示)，采用回溯算法，机器人路径规划的运动路线如图 5.7 中所示。从图中可以看出，在 U 型障碍环境中，按照回溯法机器人能够完成清扫任务的路径规划问题。

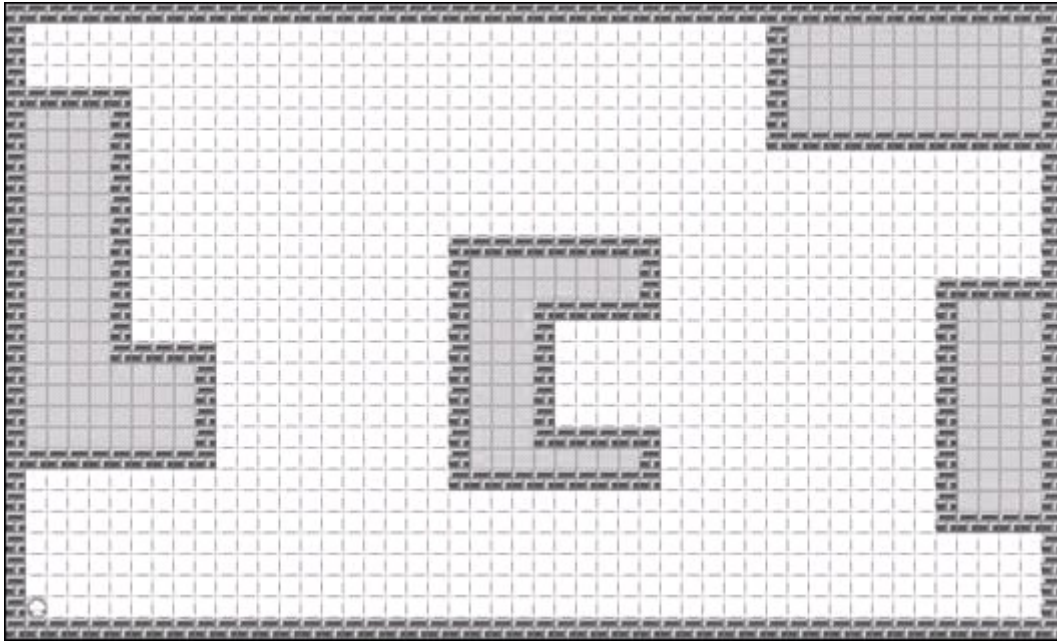


图 5.6 有 U 型障碍物的机器人运行环境

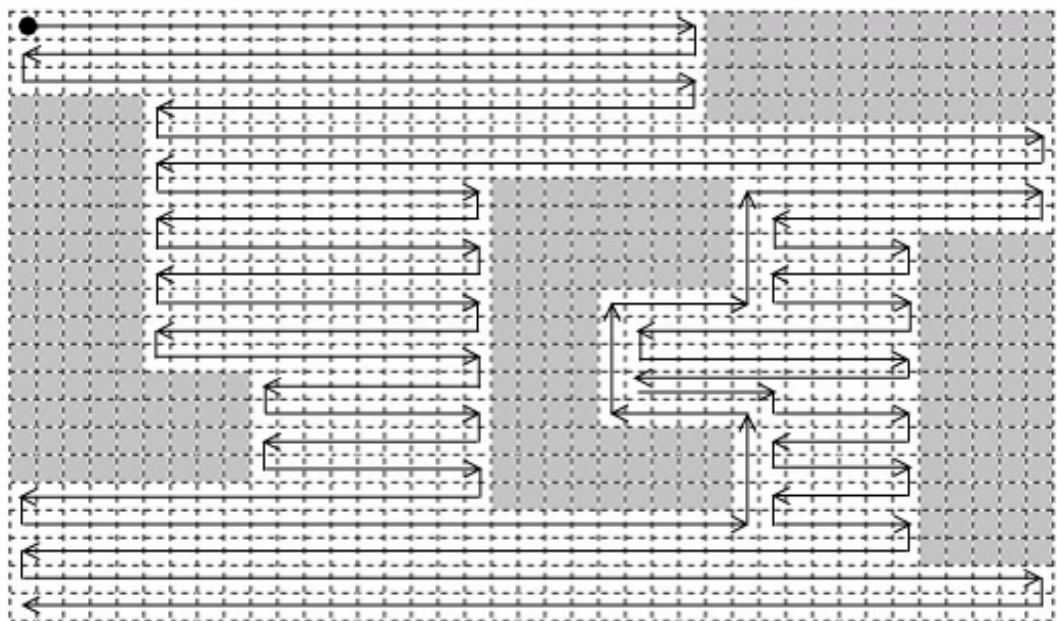


图 5.7 U 型环境中机器人的行走路线

当机器人在上图的有 U 型障碍物的环境中运动时，机器人不可避免的要困于陷阱中，这时机器人就得采用回溯法使机器人摆脱困境，图中栅格的两次相反行走方向就是机器人采用回溯法，使机器人回溯到上一个状态的过程，如果没有发现新的栅格，机器人将一直回溯，直到发现新的目标为止。

从计算机的仿真中，利用该算法能够很好的完成路径规划任务，下面是在 AS-R 机器人上的实现。

5.2 路径规划的机器人实现

AS-R 机器人也是在 Visual C++6.0 的基础上来进行编程的, 采用 MFC 的编程方式, AS-R 机器人的运动界面如下图所示



图 5.8 AS-R 机器人运动界面

AS-R 机器人的运行环境及按照路径规划的实现运行结果如下图所示。



(a)



(b)



(c)



(d)



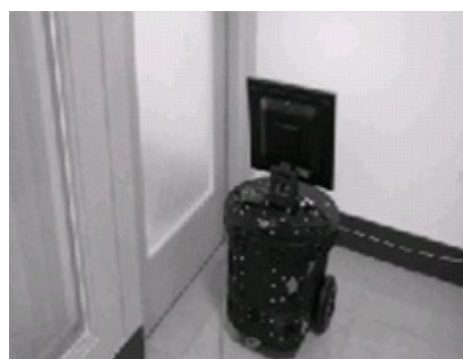
(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)



(m)

(n)

图 5.9 AS-R 机器人清扫任务路径规划实现结果

上图中的(a)和(b)表示出了 AS-R 机器人运动的室内环境。AS-R 机器人先从房间的一个角落开始运动，如上图的(c)所示，碰到障碍物后(如(d)所示)，机器人就绕过障碍物，图中的(e)(f)(g)显示了 AS-R 机器人绕过障碍物的过程。接着机器人按照路径往前行走，直到碰到墙壁，拐弯回来按照犁田式的路径继续行走，最后 AS-R 机器人遍历整个房间后停在了另一墙角中，如(n)所示。

从上面的 AS-R 机器人的实验结果可以看出，回溯算法能够适合室内机器人的遍历，在这种环境中，能够较好的完成相应的任务，遍历的效率较高。

经过大量实验的验证，AS-R 机器人都能够完成相应清扫任务的路径规划。在简单的室内环境中，AS-R 机器人完成的效率较高，能够满足清扫机器人的高覆盖率和低重复率的要求；在相对复杂的障碍环境中带有 U 型障碍物的环境中，AS-R 机器人也能够完成相应的路径规划。因此，该方法适合于室内清扫机器人的路径规划。

5.3 本章小结

本章在算法的基础上，利用计算机软件和 AS-R 机器人实物分别做了清扫任务的路径规划实验，在计算机软件上分别进行了简单环境和复杂环境的机器人路径规划仿真实验，按照回溯算法，机器人都能较好的完成相应的任务。最后在 AS-R 机器人上完成了室内清扫的路径规划任务。

6. 总结与展望

机器人将随着科技的发展应用越来越广泛，将在很短的时间内进入到各行各业为人们提供服务。清扫机器人作为机器人的新的成员，人们对于它的期望要高于其它的服务机器人，因此，清扫机器人在未来的发展将是非常迅速的。

本文介绍了服务机器人的研究现状，特别是作为服务机器人的一种——清扫机器人的研究现状和相关的关键技术，指出影响清扫机器人的关键技术有：传感器技术、多传感器融合技术、环境建模、定位等。介绍了 AS-R 轮式移动机器人的体系结构，以及功能模块和控制系统。在清扫机器人的运动学原理中，对机器人的运动模型做了分析。

在清扫机器人路径规划的研究中，主要讨论了基于任务的路径规划方法和基于行为的路径规划方法，对这两种方法的路径规划作了详细的比较。本文研究在栅格模型的基础上，将回溯引入到路径规划中的一种路径规划方法。因为栅格地图的简单、直观、便于描述环境和和计算机定位等优点，而回溯法能够很好的遍历室内环境，对于死角和陷阱问题能够很好的解决。本文的主要研究成果如下：

1. 运用栅格法建立室内环境模型；
2. 将回溯法运用于机器人的路径规划。

运用回溯算法来进行路径规划，机器人只能在环境全局的模型下进行路径搜索，机器人只能根据算法规定的行走优先级的顺序来进行行走方向的判断，在某些复杂的情况下，机器人还是会留下盲区。为使机器人更智能的行走，必须运用传感器的信息，使机器人根据传感器的信息自行判断行走的方向。今后在这方面还需进一步的研究。

参考文献

- [1]. 谭明,徐德,先进机器人控制[M]. 北京: 高等教育出版社. 2007
- [2]. <http://www.kepu.net.cn/gb/technology/robot>
- [3]. Burgard, Wolfram, Trahanias et al. Tele-presence in populated exhibitions through web-operated mobile robots. Autonomous Robots, 2003, 15(3):299-316.
- [4]. <http://www.ifr.org/pictureGallery/servRobAppl.htm>
- [5]. John L Dallaway, Robin D. Jackson, Paul H A. immers. Rehabilitation Robotics in Europe[J].IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering ,1995,3(1):368-376
- [6]. Mike Topping. The development of Handy1 a robotic aid to independence for the severely disabled[C].IEE Colloquium on Mechatronic Aids for the Disabled, 1995, (2): 1-6.
- [7]. Krishnamurthy B, Evans J. HelpMate: A robotic courier for hospital use//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Chicago,1992:1630-163
- [8]. 王炎 周大威, 移动式服务机器人的发展现状及我们的研究[J]. 电气传动,2000, (4) ,3-7
- [9]. 熊光明,赵涛,龚建伟,高峻峣. 服务机器人发展综述及若干问题探讨[J]. 机床与液压 2007,(35),212-216
- [10]. 李建军, 张济川,金德闻. 移动式护理机器人的开发. 中国康复医学杂志, 1995,10(3):126-128:
- [11]. 王田苗,张大明,刘达. 医用机器人的发展方向[J].中国医疗器械杂志,2008,32(4), 235-238..
- [12]. 张铁,谢存禧,周惠强,熊伟. 一种机器人化的多功能护理床及其控制系统[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2006,34(2): 47-51.
- [13]. 禹建丽, 张宗伟. 自主移动服务机器人的研究现状浅析[J]. 中原工学院学报 2008,19(4),8-12:
- [14]. <http://news.sina.com.cn/c/2002-10-23/1611779603.html>
- [15]. <http://www.3d3d.cn/article/gysj/rwjs/2007-07-25/1077.html>
- [16]. 朱世强,刘瑜,庞作伟,金波. 自主吸尘机器人的研究现状[J]. 机器人, 2004,26(6),569-574
- [17]. 李金山,李琳,谭定忠 清洁机器人概述[J]. 中国科技信息,2005,(5):18.

- [18]. 谭定忠, 王启明, 李金山, 李林. 清洁机器人研究发展现状[J]. 机械工程师, 2004, (06), 9-11
- [19]. 吴秋轩, 曹广益. 家用服务型吸尘机器人的发展与现状[J]. 电气传动自动化. 2003, 25(6), 1-4
- [20]. 刘瑜, 朱世强, 吴海彬, 田角峰, 葛耀峥, 金波. 自主吸尘机器人在非结构性环境下的作业规划. 2003, (01), 82-84
- [21]. <http://www.cctv.com/news/science/20040902/101221.shtml>
- [22]. 徐德, 邹伟等, 室内移动式服务机器人的感知、定位于控制[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [23]. 胡跃明, 丁维中, 吴忻生. 吸尘机器人的研究现状与展望[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(10), 631-633
- [24]. 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], 北京: 科学出版社, 2009.
- [25]. Rosencrantz M, Gordon G, Thrun S, Decentralized sensor fusion with distributed particle filters[C]. The Conference on Uncertainty in AI(UAI), Acapulco, Mexico, 2003
- [26]. Shafer G, The Dempster-Shafer theory of evidence [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1976.
- [27]. Beynon M, Curry B, Morgan P, The Dempster-Shafer theory of evidence: an alternative approach to multicriteria decision modeling [J], Omega, 2000, 28:37-50.
- [28]. Gao J B, Harris C J, Some remarks on Kalman filters for the multisensory fusion[J]. Information Fusion, 2002, 3:192-201.
- [29]. Wei li, Chnyu Ma, FM Wahl, A neuro-fuzzy system architecture for behavior-based control of a mobile robot in unknown environments [J]. Fuzzy Sets and System, 1997, 87: 133-140.
- [30]. 司现军, 王志良, 移动机器人多传感器信息融合技术综述[J]. 2004, 21(02), 1-5.
- [31]. Kuipers B, Byun Y T. A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representations. In: Robotics and Autonomous System, 1991, 8:47-63.
- [32]. Rodriguez-Losada D, Matia F. Integrating segments and edges in featured-based SLAM, In: Proceeding of IEEE International Conference on Advanced Robotics, Coimbra, Portugal, 2003, 1717-1722.
- [33]. Thrun S. Robotic Mapping: A Survey[R]. Pittsburg: CMU-CS-02-111, School of

- Computer Science, Carnegie Mellon University,2002.
- [34]. 贺伟, 梁昔明. 未知环境中移动机器人 SLAM 问题的研究进展.微计算机信息, 2005,3: 179-180
- [35]. Thrun S, Fox D, Burgard W, et al. Robust Monte Carlo Localization for mobile robots[J]. Artificial Intelligence,2001,128(1-2):99-141.
- [36]. Leonard J, Durrant-Whyte H, Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot[A]. Proceeding of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligence Robots and Systems[C].Osaka:1991,1442-1447.
- [37]. 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,2002,24 (5): 475-480
- [38]. 刘华军,杨静宇,陆建峰,唐振民,赵春霞,成伟明. 移动机器人运动规划研究综述 [J]. 中国工程科学,2006,8(1):85-94
- [39]. Oommen B, Iyengar S, Rao N,Kashyap R, Robot navigation in unknown terrains using learned visibility graphs, part I: The disjoint convex obstacle case. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(6):672-681.
- [40]. 高强. 切点法在路径规划中的应用[J].实验室科学.2008,(3):86-88.
- [41]. 普雷帕拉塔, 沙莫斯, 技术几何导论[M].庄心谷译.北京: 科学出版社, 1990
- [42]. 付庄, 王树国, 王剑英.多连通域 Voronoi 图生成算法的研究[J].系统工程与电子技术, 2000,22 (11): 88-90
- [43]. 许松清,吴海彬,林宜等.基于 Voronoi 图法的移动机器人路径规划[J].中国工程机械学报 2005(7):336-340.
- [44]. 温瑞,王航宇,谢君. 一种移动机器人路径规划方法 [J]. 兵工自动化,2009,28(12):60-63
- [45]. Khabit O. Real-time obstacle avoidance for manipulations and mobile robots. The International Journal of Robotics Research, 1985, 5(2):500-505.
- [46]. 刘满禄,张华,胡天链. 改进的人工势场法用于移动机器人导航[J]. 华中科技大学学报(自然科学版,2008,36(1):177-180
- [47]. 吴乔乔,曾虹,张翔. 一种人工势场路径规划改进算法的研究[J]. 杭州电子科技大学学报.2008, 28(3):43-46
- [48]. 刘春阳,程亿强,柳长安. 基于改进势场法的移动机器人避障路径规划[J]. 东南大学学报(自然科学版).2009,39(1),116-120
- [49]. 罗胜华,刘国荣,蒋燕. 一种基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 微计算机信息,2009,25(10):188-190.

- [50]. Maraves H, Elfes A. High resolution maps from wide angle sonar[C]. Proc. Of the IEEE Int. Conf on Robotics an Automation (ICRA'85),1985:116-121.
- [51]. 鲁庆. 基于栅格法的移动机器人路径规划研究[J]. 电脑与信息技术.2007,15(6):24-27
- [52]. 刘奎,张赤斌,易红. 在未知环境下完全遍历算法——等单元分解法[J]. 系统仿真技术.2005, 1(3):136-140

附录：攻读学位期间发表的论文

- [1]. Jianli Yu, Zongwei Zhang, Liang Xu. Process monitoring for integration of SPC and APC based on BP neural network. The Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, vol1, 2009, 378-382.
- [2]. Jianli Yu, Zongwei Zhang, Liang Xu. MMSE controller design based on RBF neural network. The Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, vol 1, 2009, 75-79.
- [3]. 禹建丽, 徐亮. 室内自主清扫机器人的路径规划. 中原工学院学报, 2010, 21(03): 1-3.
- [4]. Jianli Yu, Liang Xu. Complete Coverage Path Planning Algorithm for Cleaning Robot. The 4th International Conference on Intelligent Information Technology Application. vol1, 2010, 470-473.

致 谢

首先，我要感谢我的导师禹建丽老师，本文是在她的指导和关怀下完成的。在这两年半的时间里，禹老师在思想、学业、生活等方面给了我很多的关怀和帮助。禹老师的严谨的治学态度、渊博的知识和正直的人品，使我受益匪浅。正是禹老师的言传身教，使我在学业上和生活上的态度都有了明显的变化，并将在我的今后的人生道路上产生深远的影响。在即将毕业之际，谨此向我的导师禹建丽教授致以衷心的感谢和崇高的敬意！

感谢王璐老师在读研期间给予我的帮助和关心。

感谢在中原工学院的六年时间里老师和同学给予我的帮助，没有他们的关心和支持，我将很难完成我的学业。

最后，再一次感谢那些曾经帮助和关心我的人！



中原工学院

Zhongyuan University of Technology

硕士学位论文

MASTER'S DISSERTATION