

轮式和水下机器人的建模、 运动分析及路径规划

王秀青 王永吉 著



科学出版社

内 容 简 介

轮式和水下机器人是当前机器人研究的热点问题。本书共三篇：第一篇讨论了四类轮式移动机器人正、逆运动学问题，提出了通用的运动学模型，深入分析了四类轮式移动机器人运动平滑性和可行性，研究了相关路径规划问题；第二篇介绍了自主水下机器人路径规划方法；第三篇介绍了自主无人车平行停车、变道及超车模型。

本书是轮式移动机器人、水下机器人、自主无人车研究的理论基础，可供从事机器人研究、设计和制造的科技人员、教师、学生，以及相关研究领域的学者学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

轮式和 underwater 机器人的建模、运动分析及路径规划/王秀青, 王永吉著.
—北京: 科学出版社, 2018.6
ISBN 978-7-03-057471-8

I. ①轮… II. ①王… ②王… III. ①移动式机器人-系统建模 ②水下作业机器人-系统建模 ③移动式机器人-性能分析 ④水下作业机器人-性能分析 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 103621 号

责任编辑: 潘斯斯 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 337 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

从 AlphaGo 化身 Master 连胜世界各大围棋高手，到扫地机器人在商业中的成功推广，以及无人驾驶汽车广泛的开展上路测试，近年来，人工智能给人类社会带来了一次又一次惊喜。人工智能在各垂直领域商业化繁荣的背后，需要强大的软硬件支撑。机器人作为重要的硬件支撑之一，研究与商用的热潮正在席卷全球。无人驾驶汽车是智能汽车的一种，也可以认为是一种典型的轮式移动机器人，主要依靠车内的以计算机系统为主的智能驾驶仪来实现无人驾驶的目标，它的实现依赖于车载传感系统感知道路环境，自动规划行车路线并控制车辆到达预定目标。目前，轮式机器人的研究热点集中在自动感知、实时控制、基于大数据分析和人工智能的自动导航等层面，然而对车的几何形状及几何结构对车的运动可行性等分析相对较少。机器人的建模、运动分析及路径规划是实现机器人功能的重要理论与应用基础。

《轮式和水下机器人的建模、运动分析及路径规划》一书是作者依据多年的轮式机器人和 underwater 机器人的优秀教学和科研成果译著而成。全书共三篇 15 章。第一篇介绍了四类关键轮式机器人的正、逆运动学分析，运动的平滑性和可行性，运动学分析在高速公路设计中的应用以及相关的机器人路径规划算法。本篇内容对理解四种轮式机器人的运动可行性尤其重要，同时也给出了土木工程师根据运动学分析设计高速公路的应用实例；第二篇从基于含与或逻辑约束关系的广义约束优化问题、非线性和实体几何构造、约束优化和半无限约束优化方面，探讨了自主水下机器人的路径规划方法，机器人几何形状的假设对路径规划算法的设计具有重要影响。第三篇从理论和应用的角度介绍了自主无人车停车、变道及超车模型与求解方法，其中提出的自主平行停车及两车道超车视距模型是实现自动驾驶的理论基础。

本书在内容的选择和编排上，注重理论与工程应用、基础知识与现代技术的结合，实例丰富、生动，讲解简明概括，易于理解，内容包含了轮式和 underwater 机器人的基本概念、分类、建模，机器人的运动学和动力学、路径规划等各个方面。内容丰富，图文并茂，应用领域广泛，可供从事轮式和 underwater 机器人研究的学生、科研人员学习和参考。

本书稿的完成得到了多方的帮助和支持，在此特别感谢国家自然科学基金委员会资助的项目“Spiking 神经网络在移动机器人感知及控制中的应用研究(61175059)”、国家基金项目(61375010, 61603121, 61673160)、河北师范大学学术著作出版基金(L2016C01)和河北省自然科学基金委员会资助的项目(F2018205102)。在本书的编写过程中，得到了吕荫润、陈力、王翀、游逸、张艺品、张晓航、吴炳潮、孙萌、毕诗旋、刘颖、李桐桐、李月喜、张甲龙、马福云、刘岩、刘天昀、刘乐、史瑞雪、宋俊双等多位同志的热心帮助，在此表示感谢。对本书撰写过程中给予过帮助的所有单位和个人表示衷心的感谢！

由于编写时间仓促和作者水平有限，书中难免存在一些疏漏和欠妥之处，恳请读者批评指正。

前 言

作者

2018年3月

随着水下机器人的广泛应用，水下机器人的建模、运动分析及路径规划成为水下机器人领域的研究热点。本书主要介绍水下机器人的建模、运动分析及路径规划。本书共分五章。第一章介绍水下机器人的概述，包括水下机器人的定义、分类、组成、应用等。第二章介绍水下机器人的建模，包括水下机器人的运动学建模、动力学建模、控制建模等。第三章介绍水下机器人的运动分析，包括水下机器人的运动学分析、动力学分析、控制分析等。第四章介绍水下机器人的路径规划，包括水下机器人的路径规划算法、路径规划软件等。第五章介绍水下机器人的应用，包括水下机器人的海洋工程应用、军事应用、科学研究应用等。

本书可作为高等院校海洋工程、船舶工程、水下机器人等相关专业师生的教材，也可供从事水下机器人研究的工程技术人员参考。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此表示衷心的感谢。同时，感谢北京理工大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学等单位的领导和同事在本书编写过程中给予的支持和帮助。本书的出版得到了北京理工大学出版社的大力支持，在此表示衷心的感谢。

目 录

第一篇 四类轮式移动机器人运动学、运动分析及路径规划

第 1 章 引言	3
1.1 概述	3
1.2 轮式移动机器人的需求	3
1.3 轮式移动机器人的发展	5
1.4 轮式移动机器人的类型	7
1.4.1 普通车型机器人	7
1.4.2 双驱动机器人	7
1.4.3 同步驱动和导向机器人	8
1.4.4 全方位机器人	10
1.5 研究目的	11
1.5.1 逆运动学及正运动学	11
1.5.2 运动平滑性与可行性	11
1.5.3 运动学在高速公路和街道几何设计中的应用	12
1.5.4 路径规划	12
参考文献	13
第 2 章 四类轮式移动机器人的逆运动学和正运动学	14
2.1 概述	14
2.1.1 机械臂的正、逆运动学	14
2.1.2 雅可比矩阵: 速度、奇异点和静态力	14
2.1.3 动力学	14
2.1.4 轮式移动机器人的正、逆运动学	15
2.1.5 轮式移动机器人运动学相关研究	15
2.2 刚体机器人的运动描述和每个轮子的理想滚动条件	17
2.2.1 全局和局部参考坐标	17
2.2.2 机器人本体的运动描述	18
2.2.3 每个轮子的理想转动条件和运动描述	18
2.3 车式机器人的数学模型	19
2.3.1 泛化的约束方程	19
2.3.2 前轮的机械设计	20
2.3.3 满足 Jeantaud 条件	21
2.3.4 解逆运动学的步骤	21

2.3.5	曲率、瞬时旋转半径及其关系	21
2.3.6	车式机器人的正运动学	22
2.3.7	复合机车的数学模型	23
2.4	双驱动机器人的数学模型	24
2.4.1	双驱动机器人的逆运动学	24
2.4.2	双驱动机器人的正运动学	25
2.4.3	导向轮的运动	25
2.5	同步驱动和导向机器人的数学模型	26
2.5.1	逆运动学	26
2.5.2	正运动学	26
2.6	全方位机器人的数学模型	27
2.6.1	全方位机器人的含义	27
2.6.2	逆运动学	29
2.6.3	正运动学	30
2.7	本章小结	31
	参考文献	31
第3章	轮式移动机器人运动的平滑性和可行性	33
3.1	概述	33
3.2	车式机器人和双驱动机器人的纯平移以及纯转动的条件	35
3.2.1	纯平移的充分必要条件	35
3.2.2	纯转动的必要条件	36
3.3	方向角和导向角的连续性	37
3.4	导向角限制与可行偏移角的间隔	39
3.5	直线运动的分析	42
3.6	圆形运动分析	44
3.7	同步驱动与导向机器人的运动光滑性	50
3.8	全方位机器人的奇异性	50
3.9	本章小结	51
	参考文献	52
第4章	运动学在高速路设计中的应用	54
4.1	概述	54
4.1.1	设计用机动车	54
4.1.2	为何需要大型机动车及相关问题	54
4.2	相关工作的回顾	56
4.3	仿真结果和讨论	59
	参考文献	60

第 5 章 四类轮式移动机器人路径规划算法的适用性	61
5.1 概述	61
5.2 路径规划方法综述	62
5.2.1 点形机器人路径规划方法	62
5.2.2 C 空间障碍物的概念	66
5.2.3 圆形机器人——方位角变化对 $CO_4(B)$ 没有影响的特例	67
5.2.4 具有固定方位的多边形机器人	68
5.2.5 具有可变方位角的多边形机器人	68
5.3 四类轮式移动机器人算法的适用性	70
5.3.1 同时驱动和导向机器人	71
5.3.2 全方位机器人	71
5.3.3 车式和双驱动机器人方位角的存在性和唯一性	71
5.3.4 车式和双驱动机器人	73
5.4 本章小结	75
参考文献	75
第 6 章 具有非完整约束和导向角限制的轮式机器人的路径规划	77
6.1 概述	77
6.2 CLR 路径规划问题的总体描述	77
6.3 寻找 CLR 全局逼近路径	79
6.4 检测导向角限制性的满足程度	82
6.4.1 直线运动	82
6.4.2 圆运动	83
6.4.3 直线与圆的复合运动	84
6.5 无碰跟踪的两个充分条件	85
6.5.1 直线运动	85
6.5.2 圆运动	86
6.5.3 示例	86
6.6 检测有多边形障碍物时多边形 CLR 的潜在碰撞	88
6.7 多边形 CLR 的包络区域	89
6.7.1 包络曲线族	89
6.7.2 多边形 CLR 的包络	90
6.8 从故障中恢复	91
6.8.1 五次多项式路径	91
6.8.2 极样条路径	92
6.8.3 调整逼近全局路径	95

6.9 本章小结	96
参考文献	96
第7章 本篇结论与展望	97
7.1 结论	97
7.2 未来的研究	97
参考文献	98
第二篇 自主水下机器人路径规划方法	
第8章 绪论	103
8.1 概述	103
8.2 水下自主车式移动机器人的路径规划方法	104
8.3 本篇内容安排	105
参考文献	106
第9章 基于非线性规划和实体几何构造的水下车式机器人路径规划	109
9.1 概述	109
9.2 常规的非线性规划问题	110
9.3 基于实体几何构造的物体表示法	110
9.3.1 定义函数	111
9.3.2 布尔运算(交和并)	111
9.3.3 交和并运算的光滑近似	112
9.3.4 用于物体表示的基本实体以及对 m 的选择	112
9.3.5 平移和旋转	115
9.4 将水下机器人路径规划问题转化为非线性规划问题	116
9.4.1 将自由空间表示为配置变量的不等式约束	116
9.4.2 目标函数的设计	116
9.5 算法实现和仿真结果	117
9.5.1 算法实现	117
9.5.2 仿真结果	117
9.6 本章小结	122
参考文献	122
第10章 两种新的求解无人水下车车辆路径规划的方法: 约束优化和半无限约束优化	124
10.1 概述	124
10.2 优化问题的两种不同模型	124
10.2.1 标准约束优化	125

10.2.2 半无限约束优化	126
10.3 势域方法	126
10.3.1 势域方法的基本原理	126
10.3.2 导致局部最小的原因	128
10.4 将机器人路径规划问题转化为约束优化问题	130
10.4.1 将自由空间表示为配置变量的不等式约束	130
10.4.2 目标函数的设计	131
10.4.3 算法实验	131
10.4.4 避免局部最小的自适应目标函数	131
10.5 将机器人路径规划问题转化为半无限约束优化问题	134
10.5.1 使用隐函数表示待定系数	134
10.5.2 使用参数形式表示待定系数	134
10.5.3 仿真结果	135
10.6 本章小结	137
参考文献	137
第 11 章 “与”和“或”约束的广义约束优化问题及其在自主水下机器人中的应用	139
11.1 概述	139
11.1.1 约束优化	139
11.1.2 水下自主车式机器人路径规划	140
11.1.3 本章内容安排	141
11.2 水下自主车式机器人路径规划问题转换为约束优化问题的基本原理	141
11.2.1 SCOP 的求解方法	141
11.2.2 水下自主车式机器人路径规划的要求	142
11.2.3 原理	142
11.3 将水下自主车式机器人路径规划问题表示为广义约束优化问题	142
11.3.1 物体的分类	142
11.3.2 标准约束优化问题	143
11.3.3 广义约束优化问题	144
11.4 数学变换及其性质	145
11.5 水下自主车式机器人三维路径规划	147
11.5.1 第一类物体的结果	147
11.5.2 同时含有第一类和第二类物体的结果	148
11.6 “最坏情况”研究和方法的效能	151
11.7 本章小结	152
参考文献	153

第 12 章 一种避免位形空间计算的自主水下机车实时路径规划方法	155
12.1 概述	155
12.2 理论背景	156
12.3 障碍物和机器人在三维空间中的表示	157
12.4 机器人路径规划问题转换为半无限约束优化问题	160
12.4.1 三维空间中机器人无碰撞的充分必要条件	160
12.4.2 目标函数的设计	161
12.5 仿真实验及结果	161
12.5.1 算法实现	161
12.5.2 实验结果	162
12.6 本章小结	166
参考文献	167
第三篇 自主无人车平行停车、变道及超车模型	
第 13 章 无人自动驾驶拖车式机车变道操作的轨迹生成	173
13.1 概述	173
13.2 两步法的原理	174
13.2.1 约束方程	174
13.2.2 非完整约束轨迹生成问题转化为函数拟合过程	175
13.2.3 确定速度变化图	176
13.3 变道操作的函数拟合设计	177
13.3.1 计算 $y=f(x)$	178
13.3.2 计算 $\theta_2=\theta_2(x)$	179
13.4 本章小结	180
参考文献	180
第 14 章 使用函数拟合方法设计自主无人车平行停车	182
14.1 概述	182
14.2 非完整运动规划转化为函数拟合	183
14.3 拟合函数	185
14.3.1 五次多项式	185
14.3.2 三次多项式	185
14.3.3 三角函数	186
14.4 典型操作的运动分析	186
14.4.1 平行线过渡操作	186
14.4.2 导向角限制和最小过渡宽度 X_{\min}	188

14.4.3 倒车式停车和移出	190
14.4.4 变道、规避障碍物和平行停车操作	194
14.5 基于卫星 GPS 方法的车辆导航和控制	195
14.6 本章小结	196
参考文献	196
第 15 章 两车道公路超车视距的新模型	198
15.1 概述	198
15.2 超车行为的三个阶段和 PSD 的定义	199
15.3 超车车辆行驶路径的描述	201
15.4 超车操作的时空关系推导	203
15.4.1 情形 1: 在第一阶段达到最大速度	203
15.4.2 情形 2: 在第二阶段达到最大速度	204
15.4.3 情形 3: 在第三阶段达到最大速度	204
15.4.4 情形 4: 在第三阶段结束后仍未达到最大速度	204
15.5 在 PSD 中输入参数的效果	205
15.6 与 AASHTO 的结果相比较	210
15.7 本章小结	213
参考文献	214

第1章 引 言

1.1 概 述

第一篇

提供的现实工作空间中,机器人通常一定对目标实施可行操作,并经过执行一定的任务。

四类轮式移动机器人运动学、运动分析及路径规划

形,每个关节都机械地与其中定轴轴心轴保持相对运动,这种结构的典型实例是机器人手臂(也被称为机械手或机械臂)。

工业应用中最早被活动使用机器人系统就是机械臂,与机器人所取代的传统操纵及专用机器相似,机器人的作用域内得多,机器人能够通过程序控制完成一系列的工作(例如,能够很容易地通过再编程,使机器人实现多种操作功能),并且它们比那些专用的操作器械具有更为广泛的应用领域。机器人通常具有柔性臂的驱动臂段,借助机器人灵活的臂段结构,使得这种臂能具有更好的可操作性能。

1.2 轮式移动机器人的需求

虽然机械臂具有很多优点,但它们也具有一些严格的限制,这些限制中的大部分是机械臂的不可移动性所致。一个机器人手臂只能操作它所到达范围中的物体,由于大部分工业机械臂是固定,它们的工作空间受它们的结构所决定的最大范围所限制,零件不得不由传送带或其他机械传送设备传送到机器人面前,然后再次由这些设备传出去。为了克服由机械臂所到达范围限制的问题,探讨如下两个问题。

第一个是固定的加工单元,机械臂被固定在灵活的加工单元上,它所涉及的范围是其范围,由于机械臂的机械范围由几台机器,所以在其他机器完成任意的同时,机械臂能把零件从一台机器传送到另一台机器。当机械臂足够小,能够放到机器人附近时,这种方法效果最好。然而,该方法的一个缺点是,一旦固定的机械臂发生故障,它通常会影响装置,由于机械臂不能移动,所以机械臂又往往是固定在产品线的固定中心位置,当故障发生时,失效的机器人可能会阻塞或影响部分阻塞生产的进行(产品流),另外,如果需要用人力或设备来修理或更换机器人,则可能会造成进一步的停产浪费。

第二个是使机械臂移动,例如,通过把机械手固定在一个轮式移动机器人上,把整个

第 1 章 引 言

1.1 概 述

机器人是在计算机系统控制下的装有驱动器和传感器的一种多功能机械设备。在布满各种各样实际物体的现实工作空间中，机器人遵循一定的自然规律进行操作，并通过执行多种运动完成给定的任务。

机器人具有不同的形式：各种形状的机械臂，具有多种安装形式的轮子和腿的小车或设备。显然，机器人既不是单纯的小车，也不仅仅是机械臂。

机械臂是在机器人领域中被广泛使用的一种机械设备。机械臂由若干个可移动的被称为连杆的物体通过关节组成，如可以公转的关节(合页式的关节)、棱柱式的关节(滑动关节)。每个关节都约束着与其相连的两部分物体的相对运动。这种设备的典型实例是机器人手臂(也被称为机械手或机械臂)。

工业应用中最先被成功使用的机器人系统就是机械臂。与机器人所替代的传送带以及专用机器相比，机器人的作用通用得多。机器人能够通过程序控制完成一系列的工作(例如，能够很容易通过再编程，使机器人实现多种操作功能)，并且它们比那些专用的硬件系统具有更为广泛的应用领域。机器人通常具有更高层次的控制智能，借助机器人灵活的硬件结构，使得这种智能具有更好的可操作性。

1.2 轮式移动机器人的需求

虽然机械臂具有很多优点，但它们也具有一些严格的限制。这些限制中的大部分是机械臂的不可移动性所致。一个机器人手臂仅能操控它所能达到范围中的物体。由于大部分工业机械臂被固定，它们的工作空间被它们的连杆所能扩展到的最大范围所限制。部件不得不由传送带或其他机械传送设备传送到机器人面前，然后再次由这些设备输送走。为了克服由机械臂所能达到范围的限制所带来的问题，探讨如下两个问题。

第一个是灵活的加工单元。机械臂被固定在灵活的加工单元上，它所服务的机器就在其周围。由于机械臂的伸展范围能达到几台机器，所以在其他机器完成任务的同时，机械臂能把部件从一台机器传送给另一台机器。当机器足够小，能够放到机器人近处时，这种方法效果最好。然而，该方法的缺点是：一旦固定的机械臂发生故障，它通常会变成累赘。由于机械臂不能移动，而这些机械臂又往往是固定在产品流的靠近中心的位置，当故障发生时，失效的机器人可能会阻塞或部分阻塞生产的进行(产品流)。另外，如果需要用人力或设备来修理或替换机器人，则可能会造成进一步的生产拥塞。

第二个是使机械臂移动，例如，通过把机器人手固定在一个轮式移动机器人上，以便使

其能够从一台机器移动到另一台机器处。一台通用意义的机器人能够在工厂、家庭、农场或军事环境中自由移动之前,必须使其在感知(感觉并理解环境)、规划(轨迹的产生和路径的规划)及运动(在环境中控制机器人的运动)之间达成一种智能的连接。在此需要强调指出的是:大部分这方面的研究称为自主陆地机车(Autonomous Land Vehicles, ALV)。

过去,工厂主期望以持续的、长期的生产运行作为其工厂运作的模式。这样的工厂囤积大量的原始材料和物资,一天天很少有变化,以期达到连续(稳定)的生产力。然而,随着计算机辅助设计用于生产,以及计算机控制库存系统的出现,所有这些已发生了改变。目前,顾客希望多样化的产品和快速发货。库存货物成本的上升促使“及时”生产模式的发展。在生产中重要的操作就是在生产工位间进行零部件的传送和子部件的组装。为了使生产持续进行,工业零件通常需要快速地从—个工位传送至另一个工位。自动导向机车(Automated Guided Vehicles, AGV)是目前工业界使用最为普及的运输系统。例如,在汽车制造业,机械臂被固定在工位处(如焊接、喷漆、胶装和封口等),汽车底盘被AGV从一个工位移动到另一个工位。

AGV系统的缺点是缺乏灵活性。这些机车的运动被严格地限制在预定的路径上。一旦导向机构被安装,再进行路径调整将耗资巨大。在某些环境中,传统的AGV系统使用太麻烦,而且也不够灵活。基于此,就需要更小、更灵活的机器人系统应用于生产中。

在生产产品经常变化的工厂中,会使用数目众多的机械手臂,从而满足生产不同产品对不同机械手臂的需求。而大量机械手的配置往往会耗费很多的时间和钱财。基于此,可以看出工厂对于移动机器人的需求,它的支出通常是与机器人相关的固定机械手和传输系统所需的费用。

综上所述,机器人在制造业中正有着越来越广泛的需求。将机械手与移动机器人相结合会获得二者所具有的强大功能。

除了制造业上的需求,移动机器人还可应用于其他的一些应用领域。Todd^[1]给出了移动机器人潜在应用的详细讨论。其中包括:在对健康极其危害的环境中进行矿物挖掘、深海操作、太空探索、核及其爆炸材料的处理、工业安全、农业、军事、公共娱乐以及家庭服务等领域。

广为流行的机器人有轮式机器人、有轨移动机器人和足式移动机器人等。因为轮式陆地机车的定位方式最简单,所以迄今为止,移动机器人多为具有轮子的车式机器人。一般来说只有特殊的原因时,才不采用轮子。轨道也可能是一种便携式的铁轨,一种为轮式机器人临时所用的光滑的道路,这种路可以把负载扩展至柔软地面上并在缺口上搭起连接的路段。只有在交通发生困难的情况下,足式移动机器人才可能会被选作为轮式机器人的另一个替代物,例如,在粗糙的路面上,或在建筑物里(尤其在楼梯上)。本书主要针对轮式机器人进行研究。

一些特殊形式的机器人已有报道。Koshiyama等^[2]描述了一种有着球面轮子和弓形身体的机器人,其运动控制系统安装在轮子的内部。密歇根大学的Shan等^[3]报道了一个机械结构为蛇形的机器人的设计和动作规划,该机器人主要用在过于危险和狭小而不适于人类工作的场所。这些机器人的结构使得它能够在没有传统轮子的情况下也能移动。

1.3 轮式移动机器人的发展

自主轮式移动机器人(Autonomous Wheeled Mobile Robots, AWMR)正处于不断发展的过程。AWMR 的特性和结构需要通过它们的演化来进行评判。

作为第一个严格意义上的轮式移动机器人之一的 Shakey(图 1-1), 是由斯坦福研究院(Stanford Research Institute, SRI)所研发的。该项目在当时(1966~1972 年)可以说是雄心勃勃, 尤其由于当时没有小型计算机, Shakey 必须由固定的计算机(一台 PDP-10 最终版)通过无线电波进行通信。尽管如此, Shakey 能够解决感知、运动规划和控制等非常简单的问题。

该项目的目的在于发展人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术及其相关概念, 从而使机器人能够在真实的环境中自主地实现各种功能。该研究对于下列机器人研究领域起到了推动作用: 运动规划、解决问题、从错误中恢复, 并且在存储和重新使用已有规划的意义下学习。此项目中的主要传感器为: 一台 TV 摄像机(可以实现电动平移、倾斜、聚焦和光圈控制), 机械结构耐用的传感器, 驱动轮轴上的码盘以及测距仪。虽然此项目不是直接针对计算机视觉的, 但是系统中必须有计算机视觉相关软件, 并集成在系统的其他部分。这是可操作的(实现的)机器视觉的最早期的工作。在那个时候, 人们已意识到机器视觉将是未来研究的基本问题。

Shakey 有两个驱动轮及两个承重的导向轮, 其中两个驱动轮由两个大型的步进电机驱动。机器人在包括几间由门相连通的房间内移动, 房间中放有几个大型不规则的(如立方体和楔形体等)物体。由于该机器人以一种高度不规则和不熟练的方式移动, 因而被取名为 Shakey。

机器人在世界坐标系的位置由称作“航位推算”(dead reckoning)的方法来确定, 例如, 通过保持实际运动的轨迹来实现。然而实际的运动又取决于轮子旋转的信息, 由于轮子的滑移产生误差, 该误差又引起 Shakey 位置的计算误差。然而视觉系统不能将物体正确地融入栅格模型当中。值得注意的是: 由于“航位推算”定位误差的存在, 有效的重新定位技术将是未来研究的一个重要领域。

在 20 世纪 70 年代早期, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)与喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)合作发起了一个科研项目, 该项目旨在减少地面支撑的需要, 提供实时控制、增进在太空探索、太空装配



图 1-1 斯坦福研究院研发的轮式机器人——Shakey