



Particle Filter

移动机器人

粒子滤波定位与地图创建

Localization and Mapping for Mobile Robots

编 著

刘 洞 波 李 永 坚 刘 国 荣 黄 中 华

湘潭大学出版社



Particle Filter

移动机器人

粒子滤波定位与地图创建

Localization and Mapping for Mobile Robots

编 著

刘 洞 波 李 永 坚 刘 国 荣 黄 中 华

湘潭大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

移动机器人粒子滤波定位与地图创建 / 刘洞波等编

著. —湘潭: 湘潭大学出版社, 2016.9

ISBN 978-7-5687-0009-2

I. ①移… II. ①刘… III. ①移动式机器人—定位探测(粒子) IV. ①TP242②O572.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字((2016)第 232571 号

YIDONGJIQIREN LIZILVBODINGWEI YU
DITUCHUANGJIAN

移动机器人粒子滤波定位与地图创建

刘洞波 李永坚 刘国荣 黄中华 编著

责任编辑: 王亚兰

封面设计: 曾天怡

出版发行: 湘潭大学出版社

社 址: 湖南省湘潭市 湘潭大学出版大楼

电话(传真): 0731-58298966 邮编: 411105

网 址: <http://press.xtu.edu.cn/>

印 刷: 长沙鸿和印务有限公司

经 销: 湖南省新华书店

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17

字 数: 279 千字

版 次: 2016 年 9 月第 1 版

印 次: 2016 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5687-0009-2

定 价: 42.00 元

(版权所有 严禁翻印)

前 言

随着信息技术的发展,工业、科研、国防、娱乐等各个领域越来越需要高性能的自动化系统。智能机器人作为当代最高意义上的自动化系统,是衡量一个国家高端制造业水平的重要标志之一,受到世界各国的高度重视。移动机器人正成为一个活跃的备受关注的研究领域。

机器人在导航过程中通常需要解决三个问题:第一个是移动机器人定位问题;第二个是机器人任务规划问题;第三个是机器人路径规划问题。其中,机器人定位问题是任务规划和路径规划的基础。移动机器人定位就是要解决机器人在各时刻相对于工作环境的相对位置和角度,是移动机器人自主导航成功的关键。移动机器人要求能通过携带的摄像机、测距仪等传感器获取周围的环境信息,建立空间模型并识别自身的当前位置,根据自动规划的路径自主完成规定的任务。机器人可靠、稳定地在所处环境中自主移动是当今机器人研究的热点问题。

本书主要研究基于粒子滤波的移动机器人定位与地图创建技术,并融入了作者多年来的相关研究成果,主要内容包括粒子滤波定位原理、基于视觉的粒子滤波定位方法、基于激光测距的机器人定位与地图创建、融合激光与图像信息的机器人定位与地图创建、区间分析粒子滤波机器人定位、粒子群优化的无迹粒子滤波同步定位与地图创建等。

在本书的编撰过程中,作者研读了大量文献,参考融合了国内外专家学者们在相关领域的研究成果,在此,对他们表示感谢!

本书的出版得到了湖南省自然科学基金(项目编号:2016JJ6027)、湖南省高校科技创新团队支持计划(湘教通[2014]207号)、湖南省教育科学“十三五”规划课题(项目编号:XJK016BGD014)、湖南省学位与研究生教育教学

改革项目(项目编号:JG2016B107)、2016 年度湖南省普通高等学校教学改革研究项目(湘教通〔2016〕400 号第 610 号、617 号课题)、湖南省普通高校青年骨干教师培养基金(湘教办通〔2013〕185 号)和湖南工程学院博士科学研究基金(校办字〔2014〕17 号,项目编号:14088)、湖南省首批“2011 计划”协同创新中心“风电装备与电能变换协同创新中心”的资助。在此致以诚挚的谢意!

由于作者学术水平有限,书中难免存在不妥甚至错误之处,殷切期望广大读者批评指正。

作者

2016 年 8 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 国内外移动机器人发展概况	2
1.3 移动机器人定位与地图创建研究现状及分析	7
1.3.1 传感器信息融合的研究现状及分析	7
1.3.2 定位的研究现状及分析	8
1.3.3 地图创建的研究现状及分析	10
1.3.4 机器人 SLAM 的研究现状及分析	13
参考文献	15
第 2 章 移动机器人系统建模	22
2.1 引言	22
2.2 机器人坐标系	23
2.2.1 AS-R 移动机器人平台	23
2.2.2 机器人坐标系	24
2.3 地图模型	25
2.4 运动模型	25
2.5 传感器分类与感知模型	27
2.5.1 传感器的分类	27
2.5.2 视觉传感器感知模型	28
2.5.3 激光测距仪感知模型	29
2.5.4 传感器噪声模型	31

参考文献	31
第3章 粒子滤波定位原理	32
3.1 引言	32
3.2 基于概率的定位方法	33
3.2.1 状态空间模型	33
3.2.2 贝叶斯滤波原理	33
3.2.3 基于贝叶斯滤波的定位	36
3.3 机器人粒子滤波定位方法	40
3.3.1 粒子滤波原理	41
3.3.2 基于 PF 的机器人定位算法	45
3.4 常规粒子滤波存在的问题	47
3.4.1 重要性函数选择问题	47
3.4.2 粒子退化问题	47
3.4.3 计算效率问题	48
3.4.4 粒子滤波定位存在的问题	48
3.5 粒子滤波的一些改进方法	49
3.5.1 无迹粒子滤波方法	49
3.5.2 进化粒子滤波方法	50
3.5.3 辅助采样-重采样方法	50
3.5.4 规则化采样方法	50
3.5.5 自适应粒子滤波方法	50
参考文献	51
第4章 基于视觉的粒子滤波定位方法	55
4.1 引言	55
4.2 用于建模与定位的机器人视觉技术	56
4.2.1 基于兴趣点的环境建模与定位	56
4.2.2 基于图像外观的环境建模与定位	58
4.2.3 立体视觉技术	59
4.2.4 视觉环境建模与定位的难点和趋势	60

4.3 视觉不变量理论	64
4.3.1 视觉不变量理论概述	64
4.3.2 变换群	65
4.3.3 特征不变量	66
4.3.4 仿射变换	66
4.4 尺度空间理论	67
4.4.1 尺度空间理论的发展历程	67
4.4.2 尺度空间	69
4.4.3 尺度检测机制	72
4.5 图像不变特征的属性及其分类	73
4.6 图像不变特征的构造方法	74
4.6.1 矩不变量	74
4.6.2 变换域特征	75
4.6.3 特征点和特征区域	75
4.7 局部不变特征检测方法	76
4.7.1 角点特征检测方法	76
4.7.2 斑状特征检测方法	79
4.7.3 区域特征检测方法	81
4.8 局部不变特征描述方法	85
4.8.1 基于微分的描述符	85
4.8.2 基于分布的描述符	85
4.8.3 不变矩描述符	86
4.9 图像的不变性特征	87
4.9.1 SIFT 特征描述符	87
4.9.2 SIFT 算法的特点	88
4.10 ISIFT 特征算法	89
4.10.1 ISIFT 尺度空间极值检测	89
4.10.2 ISIFT 极值点精确定位	91
4.10.3 ISIFT 关键点方向的确定	92
4.10.4 ISIFT 特征点描述子的生成	93
4.11 ISIFT-MCL 定位算法及分析	94

4.11.1	ISIFT-MCL 定位算法	94
4.11.2	实验结果与分析	96
	参考文献	101
第 5 章	融合异质传感信息的机器人定位方法	114
5.1	引言	114
5.2	多传感器信息融合	115
5.2.1	多传感器信息融合的定义	115
5.2.2	多传感器信息融合与移动机器人的关系	116
5.3	多传感器信息融合的处理模型	117
5.4	多传感器信息融合的结构问题	118
5.4.1	融合的层次性	118
5.4.2	融合的控制形式	122
5.5	多传感器融合算法	124
5.5.1	加权法	124
5.5.2	基于参数估计的信息融合	125
5.5.3	D-S 证据理论	125
5.5.4	神经网络	126
5.5.5	卡尔曼滤波	126
5.5.6	其他方法	127
5.6	基于曲率特征分割的激光地图创建方法	128
5.6.1	激光扫描数据的地图创建原理	128
5.6.2	激光扫描数据的预处理	129
5.6.3	自适应离散曲率计算与特征分割	131
5.6.4	环境特征提取与局部地图创建	133
5.6.5	全局地图创建	136
5.6.6	地图创建实验与分析	139
5.7	图像检索的分类	141
5.7.1	基于文本的图像检索	141
5.7.2	基于内容的图像检索	143
5.7.3	基于语义的图像分类	146

5.8 图像检索算法的评价准则	147
5.8.1 命中准确率	147
5.8.2 查准率和查全率	147
5.8.3 ANMRR	148
5.8.4 排序值评测法	149
5.9 机器人定位环境特征图像检索方法	149
5.9.1 图像颜色特征	150
5.9.2 图像的随机过程描述	155
5.9.3 高斯混合矢量量化	156
5.9.4 GMVQ 图像颜色特征的提取	158
5.9.5 图像特征相似性度量	159
5.9.6 图像检索实验与分析	161
5.10 融合异质传感信息的 HSIF_PF 定位方法	163
5.10.1 HSIF_PF 运动预测	163
5.10.2 HSIF_PF 激光测距感知更新	163
5.10.3 HSIF_PF 视觉感知更新	164
5.10.4 HSIF_PF 信息融合	164
5.10.5 自适应重采样	166
5.10.6 LSAC_PF 定位实验与分析	166
5.10.7 GMVQ_PF 定位实验与分析	168
5.10.8 HSIF_PF 定位实验与分析	169
参考文献	172
 第 6 章 区间分析粒子滤波机器人定位方法	 184
6.1 引言	184
6.2 区间分析的起源和发展	185
6.2.1 区间分析的起源	185
6.2.2 区间分析的发展	186
6.3 区间分析在控制理论领域的应用	188
6.3.1 参数与状态估计	188
6.3.2 鲁棒控制	190

6.4	区间分析理论基础	192
6.4.1	区间及其基本量	192
6.4.2	区间向量和区间矩阵	193
6.4.3	区间运算	194
6.4.4	包含方程与包含测试	197
6.5	IUPF 全局定位算法	199
6.5.1	区间分析运算	200
6.5.2	约束满足问题	200
6.5.3	IUPF 定位算法	201
6.6	IUPF 全局定位算法的实现	202
6.6.1	IUPF 状态预测	202
6.6.2	IUPF 感知更新	203
6.6.3	IUPF 位姿估计	203
6.6.4	IUPF-SLAM 算法流程	204
6.6.5	实验与结果分析	205
	参考文献	207
第 7 章 粒子群优化的无迹粒子滤波 FastSLAM 算法		212
7.1	引言	212
7.2	优化算法的基本概念	213
7.2.1	优化问题	213
7.2.2	优化算法及其分类	214
7.2.3	局部优化算法	215
7.2.4	全局优化算法	215
7.3	智能优化算法	216
7.3.1	进化计算	216
7.3.2	群智能算法	219
7.3.3	其他智能优化算法	221
7.4	粒子群优化算法	223
7.4.1	粒子群算法的基本形式	223
7.4.2	粒子群算法的基本流程	224

7.4.3	标准粒子群算法	225
7.4.4	粒子群算法的控制参数	225
7.4.5	粒子群算法与进化算法比较	227
7.5	粒子群算法的主要模型	230
7.5.1	基本粒子群优化算法模型	230
7.5.2	带惯性权重的粒子群优化模型	231
7.5.3	邻域版粒子群优化模型	232
7.5.4	全面学习粒子群优化模型	232
7.5.5	离散粒子群优化模型	233
7.6	FastSLAM 算法	233
7.6.1	移动机器人 SLAM 问题	233
7.6.2	FastSLAM 算法原理	235
7.6.3	FastSLAM 算法分析	237
7.7	PSOU-SLAM 算法	239
7.7.1	PSOU-SLAM 状态估计	239
7.7.2	PSOU-SLAM 路标估计	241
7.7.3	PSOU-SLAM 算法流程	246
7.7.4	实验与结果分析	248
	参考文献	252

第1章 概述

1.1 引言

移动机器人是一种能在未知或部分未知环境中自主运动的智能化装置,具备环境感知、行为规划、动态决策、执行决策等功能。传统机器人一般通过场景再现和预先编写程序设定动作,自主能力比较差。而且,传统机器人携带的传感器种类单一、性能比较差,不能很好地和工作环境进行交互,更谈不上实现人工智能层面的自主行动。随着计算机和人工智能技术的飞速发展,机器人的功能和技术层次都有了很大的提高,智能移动机器人也随之发展起来。

移动机器人的自主性主要体现在对环境的感知和理解,行为的自主规划、自我学习、自我适应等方面。移动机器人的研究涉及计算机、传感器信息融合、模式识别、自动控制、人工智能等多个学科,集中体现人工智能和计算机技术的研究成果,在工农业、医疗服务、航空航天、军事及日常生活中应用越来越广泛,在促进相关学科的发展、促进科技转化为生产力等方面发挥着重要作用。在这些应用中,可靠的定位和地图创建是机器人导航的基础^[1]。机器人能否在运动过程中连续成功地定位,决定着机器人能否在导航中成功地完成路径规划、跟踪等任务。由于没有先验地图信息,机器人进入未知环境后如何利用传感器感知外界信息来自主定位,如何准确地描述环境中的路标信息来建立环境地图,成为移动机器人导航需要解决的课题。

因此,对传感器信息处理、粒子滤波定位原理、基于视觉的粒子滤波定位方法、基于激光测距的机器人定位与地图创建、融合激光与图像信息的机器人定位

与地图创建、区间分析粒子滤波机器人定位、粒子群优化的无迹粒子滤波同步定位与地图创建等方面进行进一步的研究有着重要的理论意义和现实价值。

1.2 国内外移动机器人发展概况

移动机器人的研究范围涉及人工智能、模式识别、传感器技术、自动控制、卫星导航等多个学科,各个学科交叉融合,集成了人工智能技术与信息科学的最新成果,它是一个国家科研实力综合水平的集中体现。

20 世纪 60 年代末期,美国斯坦福研究院的 Nils Nilsson 和 Charles Rosen 等人研制出了名为 Shakey 的机器人,如图 1.1 所示。这是具有自主移动意义的机器人(Autonomous Mobile Robot,AMR)研究的开端。

20 世纪 70 年代末期,法国系统分析与架构实验室研制出了欧洲第一个移动机器人 HILARE。该机器人安装了视觉传感器、超声波传感器和激光测距仪等设备,采用二维多边形进行环境建模,利用全局坐标系实现了机器人的自主导航和路径规划功能。

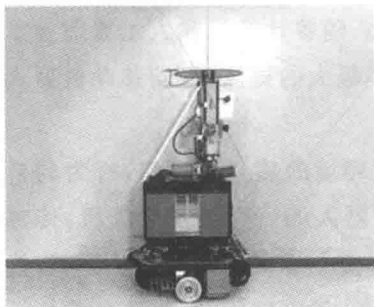


图 1.1 Shakey 自主移动机器人



图 1.2 Navlab11 自主车

20 世纪 80 年代,智能移动机器人的研究越来越广泛地运用到了实际中,其中,地面自主车是最具代表意义的研究成果。美国卡内基梅隆大学(Carnegie Mellon University,CMU)的地面智能车研究中心从 1986 年开始研究 Navlab 系列自主车,现在已经研究出 Navlab11 自主车,如图 1.2 所示。ActiveMedia 机器人公司出品的先锋系列机器人是室内移动机器人性能比较突出的代表,如图 1.3 所示。以上机器人都装备了多种外部传感器,可以实时感知外部环境信息,创建地图,完成自主定位等。

除了常见的轮式移动机器人以外,室内移动机器人还有类人型机器人。在类人型机器人的研究方面日本一直处于国际领先地位,图 1.4 所示为本田公司研制的类人机器人 ASIMO。



图 1.3 PIONEER3 机器人

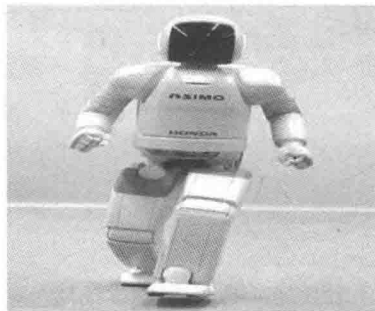


图 1.4 ASIMO 机器人

20 世纪 90 年代,更高层次传感器信息处理技术、高适应性的控制技术、真实环境下的规划技术等成为主要研究方向。期间最著名的智能系统是美国国家航空航天局喷气推进实验室研制的“勇气号”火星车。“勇气号”火星车拥有柔性的机械手臂,配备 9 个摄像机,如图 1.5 所示。

2001 年索尼公司推出的 AIBO 机器人装备了 CCD 彩色摄像机、触觉传感器、红外距离传感器、角速度传感器和一个加速度传感器,如图 1.6 所示。



图 1.5 “勇气号”火星车

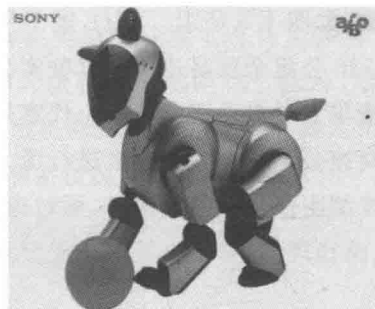


图 1.6 索尼 AIBO 机器人

2004 年,索尼展出了最新研究的 QRIO 机器人。QRIO 最敏感的部位是头部,安装了两个用来全方位扫描的摄像头。QRIO 能歌善舞,会招手,摆弄手指,还可以潇洒自如地踢足球,如图 1.7 所示。

2011 年 11 月 26 日 15 点 02 分(北京时间),美国国家航空航天局发射了“好奇号”火星车(Curiosity),2012 年 8 月 6 日中午 13 点 31 分(北京时间),“好奇号”成功降落在火星上,它总共携带 10 台设备,数量是“机遇号”和

“勇气号”的两倍,其中,“好奇号”装备的两部相机分辨率很高,能够分辨出放在 7 个足球场距离以外的球是足球还是篮球,如图 1.8 所示。



图 1.7 索尼 QRIO 机器人



图 1.8 “好奇号”火星车

国内对移动机器人的研究起步较晚,但近年来取得了很大的进步。国家自然科学基金关于机器人研究的立项数目持续快速增长,从 2008 年的 58 项增长到 2012 年的 132 项。

20 世纪 80 年代末开始,国防科技大学的贺汉根教授带领的团队一直从事无人驾驶自主车的研究。2001 年成功研制出时速达 76 公里的自主车;2003 年成功研制出我国首台高速自主车,最高时速可达 170 公里;2006 年研制出新一代无人驾驶自主车红旗 HQ3,在可靠性和小型化方面取得了较大的突破,如图 1.9 所示。2011 年 7 月推出的自主车成功地完成了从长沙到武汉 286 公里全程高速无人驾驶实验,处于世界先进水平。

清华大学自主研制了新一代室外智能移动机器人 THMR-V 型智能车,可在高速公路和一般道路上进行无人自主行驶,如图 1.10 所示。车体装备了激光测距仪和彩色摄像机,可对道路与障碍物进行检测。视觉处理、信息融合、路径规划、行为决策等功能分别由两套计算机系统控制完成。



图 1.9 参加演示的红旗 HQ3



图 1.10 清华 THMR-V 型智能车

中科院自动化研究所成功研制了移动机器人 CASIA-I,该机器人可广泛应用于公共场合、家庭等场所的服务与娱乐等方面,如图 1.11 所示。CA-SIA-I 机器人主要包括传感器、控制器和运动机构等基本结构。配备的传感器有触觉传感器、超声传感器和红外传感器,机器人顶部装有 CCD 摄像机。CASIA-I 能够理解所处的外部环境信息和自身的状态,并实时进行运动控制决策、最优路径规划,实现轨迹跟踪、自主移动等功能。

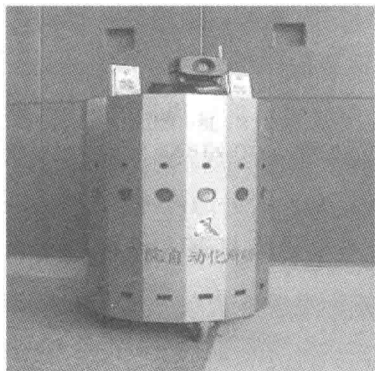


图 1.11 机器人 CASIA-I



图 1.12 导游服务机器人

哈尔滨工业大学和海尔公司联合研制出了导游服务机器人,如图 1.12 所示。该机器人由多传感器信息融合避障模块、伺服驱动模块、路径规划模块、语言识别及合成模块组成。该机器人在类结构环境下可自主移动,并绕过障碍物。语音识别模块控制机器人和人进行简单的对话。此外,哈尔滨工业大学机器人研究所相继推出了保安型机器人。这种保安机器人通过传感器可及时发现火光、烟雾、非法入侵等异常情况,如图 1.13 所示。



图 1.13 保安型机器人

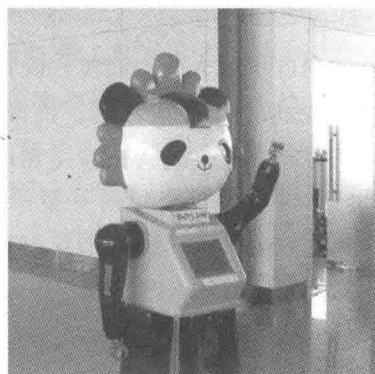


图 1.14 福娃智能机器人