



装备科技译著出版基金

Simultaneous Localization and Mapping for Mobile Robots: Introduction and Methods

移动机器人同步定位 与地图构建

【西班牙】Juan-Antonio Fernández-Madrigal

José Luis Blanco Claraco 著

石章松 谢君 董银文 吴中红 等译



国防工业出版社

National Defense Industry Press





装备科技译著出版基金

军队“2110工程”资助出版

移动机器人 同步定位与地图构建

**Simultaneous Localization and Mapping for
Mobile Robots: Introduction and Methods**

[西班牙] Juan-Antonio Fernández-Madrigal 著
José Luis Blanco Claraco

石章松 谢 君 董银文 吴中红 等译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字: 军 -2014 -003 号

图书在版编目 (CIP) 数据

移动机器人同步定位与地图构建/ (西) 简-安东尼奥·费尔南德斯-马德里加尔, (西) 琼斯·路易斯·布兰科·克拉拉科著; 石章松等译. —北京: 国防工业出版社, 2017. 10

书名原文: Simultaneous Localization and Mapping for Mobile Robots: Introduction and Methods

ISBN 978-7-118-11314-3

I. ①移… II. ①简… ②琼… ③石… III. ①移动式机器人—定位—研究②移动式机器人—构图—研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 236646 号

First published in the English language under the title “Simultaneous Localization and Mapping for Mobile Robots: Introduction and Methods” by Juan-Antonio Fernández-Madrigal; José Luis Blanco Claraco.
Copyright © 2013 by IGI Global, www.igi-global.com.

本书简体中文版由 IGI Global 授权国防工业出版社独家出版。
版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 31¼ 字数 574 千字

2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 198.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

译者序

同步定位与地图创建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM),是指在没有任何环境先验信息且自身位姿(位置和姿态, Pose)不确定的条件下,无人平台基于搭载的传感器,在移动过程中进行位姿估计,同时以增量的形式对周围环境进行感知、构建特定形式的地图的过程。由于对自身的定位和对周围环境的感知是无人平台实现自主化运动、执行所担负的使命任务的基础,因此 SLAM 被认为是实现无人系统真正自主的关键,被称为机器人自主化的“圣杯”。

最初,机器人对未知环境进行探索时,机器人的自定位与环境地图的创建被视为两个独立的处理过程,Smith 和 Cheeseman 最先将机器人的地图创建与位置置于基于概率论的统一框架下,建立了联系路标(Landmarks)与几何不确定性(Geometric Uncertainty)间关系的统计学基础,并指出,机器人运行在某个未知的环境中开展工作时,具体将以机器人相对固定的估计位姿为标准,完成各个路标的自动估计,因此地图中的各个路标估计是相互关联的。此后数年间,基于误差最小化或降低路标关联性影响作用的研究则成为机器人定位与地图创建的主要研究课题,这一时期,定位或者地图创建成为了不同研究工作的切入点,而对上述两个课题的综合性研究却相对无人问津,整体技术发展处于停滞状态。之后, Durrant Whyte 等首次将定位与地图创建这个综合性的技术课题用 SLAM 这一名词进行表述,制定了 SLAM 的具体理论分析框架,并针对该课题的收敛性进行了检验和报告,由此机器人的一致性建图问题扩展为机器人的同时定位与地图构建问题,SLAM 方法的研究获得新的突破,进入新的研究阶段。随后, Csorba 从 Durrant Whyte 的研究成果出发,对 SLAM 的收敛性进行了针对性的研究检验,并初步确定了该理论的正确性。自从 1986 年 Smith 等提出 SLAM 的基本问题至今,经过 30 多年的发展,SLAM 研究领域已然呈现出百花齐放、百家争鸣的态势。随着传感器技术、计算机视觉、优化方法的发展以及计算机运算能力的提升,目前针对 SLAM 问题,从处理方法的角度大致形成了两大类:基于滤波方法的 SLAM 和基于优化方法(主要是图优化方法,有时也称为基于平滑的方法)的 SLAM。

SLAM 问题本质上是状态估计问题,即通过机器人运动学和传感器信息对机器人位姿和地图特征进行估计,因此从贝叶斯理论出发,基于滤波方法的 SLAM 将每一时刻的系统模型描述为一个高斯概率模型, $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{z}^{1:t}, \mathbf{u}^{1:t}, \mathbf{x}_0) \sim N(\mathbf{x}_t; \hat{\mathbf{x}}_t, \mathbf{P}_t)$, 其中 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 表示当前时刻系统状态的估计值, $\mathbf{P}_t$ 表示该状态估计值的协方差矩

阵,SLAM 的目的即为求解 x_t 的最优估计值 $\hat{x}_t$ 及协方差矩阵 P_t ,其算法形式为一个标准的两步递归(序列):预测(时间更新);修正(量测更新)。系统状态由一个滤波器不断地更新,得到机器人当前位姿(位置、姿态)和环境地图特征位置信息构成的系统状态进行后验概率估计。基于滤波方法的 SLAM 主要的滤波器有 EKF 和 PF,其中基于 EKF 的方法应用最为广泛。

基于 PF 的 SLAM,又称为序贯蒙特卡洛方法,最典型的是 Fast SLAM 方法及其改进方法 Fast SLAM2.0。该方法把移动机器人路径与地图的联合后验分布估计的问题分解为移动机器人路径的估计问题和基于移动机器人路径的路标估计问题。而在移动机器人的路径已知的条件下,各个路标的估计可以独立进行。因此该方法把一个高维的滤波问题分解为了一系列低维的估计问题。在 Fast SLAM 算法中,路径估计利用粒子滤波器来实现,而各个路标的估计利用 EKF 来独立实现。从本质上说这种形式的估计方法可以称为 Rao-Blackwellized 粒子滤波器方法。

本书针对 SLAM 问题的经典理论,从机器人的发展历史论起,详细介绍了基于滤波的 SLAM 所涉及的概率论与统计学知识,在此基础上,分别针对定位与地图构建两个 SLAM 的核心问题,由简到繁、由易到难,深入浅出地进行了讨论,给出了相应问题解决方案的详细步骤。定位问题中,介绍了参数化滤波方法(主要包括卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波以及无迹卡尔曼滤波)与非参数滤波方法(主要包括离散贝叶斯滤波器、直方图滤波器与粒子滤波器),并对比分析了不同方法的优缺点;地图构建问题中,首先论述了常用地图的类型、特点,然后给出了贝叶斯框架下各类地图的构建过程。在分别论述了定位与地图构建问题的处理方法之后,在统一的贝叶斯估计框架下,给出了 SLAM 问题的完整处理方法。

结合 SLAM 问题相关处理理论的最新发展,针对 SLAM 问题的高级话题,如鲁棒性、多传感器融合以及可扩展性问题,进行了讨论,并对图 SLAM 方法、全寿命 SLAM 的相关内容进行了介绍。

本书面向的读者包括相应领域的从业者、本科学生、研究生以及研究人员。为保证书中内容的完整性,除了在正文中对概率论与统计学基础知识进行了阐述外,还在附录中对书中相关内容涉及的其他基础知识进行了补充,具有很好的可读性。

本书的第 1~4 章由石章松翻译,第 9、10 章、附录由谢君翻译,第 5、6 章由董银文翻译,第 7、8 章由吴中红翻译,最后由石章松统稿。在本书的翻译过程中,博士研究生吴鹏飞、贾正荣,硕士研究生刘志超、闫鹏浩等进行了相关文字处理工作。鉴于译者水平有限,书中不可避免存在失当之处,恳请读者朋友不吝提出宝贵意见。

译者

2017 年 3 月

序 言

理论型专家和实践型专家司空见惯,理论加实践的“双料专家”却属凤毛麟角。而 Juan-Antonio Fernández-Madrigal 博士和 José Luis Blanco Claraco 博士则在理论与实践两方面都是杰出代表:他们提出了许多新奇的概念,而这些概念均在广泛的现实世界中进行了严格的测试。2007 年秋,我很荣幸地在牛津大学与 José 有过一次愉快的会面。我和 José 分别作为主办方和访问学者同时参加了移动机器人小组的会议。一如往昔,牛津汇聚了世界上在机器人和视觉处理领域的顶尖学者,尤其是运动结构问题 (Structure from Motion, SFM) 和即时定位与地图构建 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) 等领域的学者们。即便是在这种高手如林的集会中, José 的贡献仍然令人印象深刻:他提出了高效而完善的算法,并构建了基于实时数据的鲁棒实时系统。

SLAM 问题所涉及的范围广泛。数十年来的研究使得学者们将 SLAM 问题看作是实现自主机器人技术基础性的先决条件,并朝着获得解决方案的方向建立了许多的理论体系和系统。本书内容十分丰富,是作者多年研究的总结。本书向初学者们提供了足够的历史背景知识和理论基础,通过论述该领域的焦点问题,使得读者们投入其中,并掌握这一令人兴奋的主题。作者首先将问题沿着一条轴线进行了划分,将 SLAM 问题划分为空间知识的表示问题、场景的结构和动力学问题、先验知识的可用性问题以及机器人所携带的传感器和致动器的种类等。接着介绍了目前市场上可见的机器人、这些机器人的感知以及致动能力,并讨论了这些移动平台被设计出来所要解决的各种任务。

在介绍了 SLAM 问题以及涉及的硬件(各种移动机器人)之后,作者从概率以及统计的角度深入介绍了相应的数学工具(为了使本书的内容相对独立而完整,从而使更多的读者不需要过多阅读相应的数学知识就能学习使用本书,作者还提供了—个内容丰富的附录来对该部分的内容进行补充)。近年来,这些数学工具在建立自主机器人系统的相应准则以便于它们可以适用于现实世界中提供了十分显著的帮助。因此有人说计算机视觉是估计理论在图像方面的应用,而 SLAM 问题则是估计理论在机器人传感器数据上的应用。确实,现在概率估计理论在感知问题的处理中处于核心地位。通过首先介绍概率理论,作者提取了理解自主定位与地图构建这一主题所必需的核心数学基础的精华。

SLAM 问题通常分解为两个方面:首先解决定位问题;然后解决地图构建问题。由于固有的不确定性存在于任何真实系统中,这样的分解方法可以导致机器

人内部世界模型的不一致性。然而,从教学的角度出发,首先将定位作为一个独立的问题进行讨论更有利于解决 SLAM 问题。本书将采用这种分解方法并通过讨论定位问题介绍运动模型、传感器模型以及贝叶斯类滤波器——所有的核心概念需要了解更多的内容。

本书还讨论了地图构建的内容。“地图”的种类可谓多种多样。一些科学家会争辩说任何国家的 Saving Machine 储蓄机构构成了一幅粗略的“地图”;另外一些人则会认为内部表示必须“看起来”像某种我们看到的几何那样。概括来讲,机器人所构建的地图取决于其所要完成的任务以及其所携带的传感器。基于视觉的地图将会与基于激光的地图大相径庭,而几何学的地图将与基于“外观”的地图有区别。理解了地图构建章节的内容之后,读者将能够知道怎样应用正确的地图构建工具和配套的传感器来解决其所面对领域中的机器人地图构建问题。

本书最后讨论了 SLAM 问题的高级主题和未来的研究方向。作者指出,长期自治问题与终身学习问题正在吸引越来越多的关注。现在的机器人在无人干预下的操作通常持续的时间很短,但已经有一些系统演示了更长的时间。最先进的定位与地图构建系统已经在大范围环境中取得令人信服的结果。SLAM 学术界中所提出的并在本书中讨论的三个主要经验是:①正确地建模不确定性的重要性;②使用图形化,用相对流形表示;③使用可扩展的位置识别技术。尽管这些经验是宝贵的,但仍然有许多问题有待解决。机器人系统将要在越来越大的大范围环境中长时间运作来完成任务,在本书的最后一章总结和指出了我们将要面临的这些主要问题和挑战。

书中提出的技术与方法在移动机器人感知处理中处于核心地位。本书的作者则是理论与实践兼具的综合型专家,他们将其丰厚学识倾囊相授,并尽力使得本书内容完整、完善并且易于理解和学习。在掌握了书中的内容之后,读者将做好准备,在日益发展的移动机器人定位与地图构建领域贡献自己的经验与知识,为迎来对人类社会大有帮助的机器人长时间自治时代贡献自己的力量。

Gabe Sibley

美国乔治·华盛顿大学

前 言

目前,机器人正面临与 20 世纪第一世界的人类社会中许多成员类似的挑战:从一种有利的、预知位置的工业环境——主要是作为机械臂——向一个位置未知、未定义的且与人并肩工作的环境发展;从与人一起工作的角色向与人一起生活的角色转变;从由外壳和螺栓组成的机械装置变得更具灵性地感知其所处的世界。随着我们周围的世界变得愈发动态、庞大且复杂,已经远远超出了机械臂所能处理的范畴,移动机器人已经将其近亲机械臂抛于身后。

从 20 世纪 60 年代类似于家电产品的第一个原型样机,到现在的已经跳出了 manga 电视系列产品的商用化的具有人的特点的机器人,移动机器人正逐步在人类周围愈发有效且安全地移动。以今天的眼光看来,不难想象如果它们仅具有其生产商所声称的功能的一部分,它们将怎样与人类进行交互,需要具有哪些应用,以及通过何种方式在人类的日常生活中给我们提供帮助。

普通大众可能会对这些机器人的实际限制感到惊异。在对其外观感到惊喜的同时(从科学的角度,确实如此),要知道仅仅是在近 20 年,机器人学领域的两个基本处理过程——定位与地图构建——理论才取得第一次的一致与成功。借助于此,机器人才能执行我们赋予它们的任务:知道它们所处环境中的位置,清楚其所处环境看起来像什么。时至今日,尽管关于机器人有相当瞩目的科学文献,但是这两个基本问题依然不能认为能解决所有情形。本书的目标在于将这些文献介绍给读者。具体而言,将集中介绍基于概率论与统计学的机器人定位与地图构建方法。

根据所得到结果的重要性和质量,涉及基于概率论的定位与地图构建方法理论可能会相当繁琐。讨论这些复杂性的书籍与论文随处可见,但由于作者们并非相应领域的研究人员,缺乏相应背景的坚实数学基础,因此并不能发现问题的症结所在。除此之外,这些大都出现在期刊、书籍以及会议论文中的文献,很多情况下,处理的是不同原则之下不同的术语,这些原则与术语常常是混淆的。由于机器人已经走出实验室,走向了普通大众的实际使用中,我们相信现在是将这些概念以一种有别于传统科学术语的方式给大家进行全面介绍的时候了,将理解机器人相关领域的问题所涉及的基本概念,无论其来自何种科学领域,集中起来讨论。

结合两位作者在这一领域多年来的研究与教学经验,从作者的视角出发,我们将本着严谨的态度采用尽可能便于读者接受的方式达到前文所述的目标。全书将主要集中在以下三个方面:①对涉及的相关理论的推论进行解释和证明,包

括那些被文献所忽略的定理的按步进行的证明;②对其他文献中论述有误却自以为是的内容,包括概率论、统计学以及机器人基础等进行论述;③对所论及的理论方法的历史发展进行简要论述,不沿其时间线进行详细介绍但是对其背景进行扼要说明。我们的目的在于让感兴趣的读者能够真正全面而深入地了解提到的主题,而不是仅对相关有效且先进的数学工具进行晦涩浅显的论述。

本书旨在为相应领域的从业者、本科学生、研究生以及研究人员提供一个有用的指导性文献。阅读本书不需要有概率论以及统计学等基础知识背景(如果有的话可以更快地阅读本书),本书有两章的内容专门针对这两个主题进行论述。同时,对于物理学、积分学和代数学的知识背景也要求很低;不过,一本对任何知识都能自给自足的书只能是理想化的(还是要有一定的背景知识)。因此,我们假设读者具有上述三个方面的基础知识,在附录 E 中,我们提供了对于理解问题相对重要的概念的知识强化内容。

本书由三部分组成。第一部分相对于其他书籍独具特色,集中讨论了所需要的机器人学、概率论以及统计学背景知识,以便于对后续内容进行更好的学习。第二、第三部分按照本书论述的问题的逻辑顺序展开,分别讨论定位与地图构建内容。这种组织模式,既便于读者按序学习,又便于根据个人需要有选择地阅读。

最初产生编写本书的想法源于 Juan 在教授研究生关于移动机器人课程时的授课笔记。本书中的主要内容,包括目前出现在本书中的概念与公式,已经在课堂上使用了多年,这些内容在更多的介绍性课程上同样易于接受。在使用本书时,如果学生具备相应的数学背景知识,结合教学目标,可以忽略第一部分的内容。本书同样介绍了许多即时定位与地图构建(SLAM)的高级主题以及很多的最新发展,大多基于 José 博士研究生期间及后续的研究工作。

总之,本书能够为深入开展相关领域的研究学习打下基础,我们希望本书能够成为引导读者沉迷于本领域旅途的出发点。对概率机器人学进行研究不可否认是十分艰难的,但我们保证,这将是十分值得的。我们最大的希望是本书能够为读者提供所需的工具,使读者能沿着一个良好的轨迹,进入基于概率学的定位与地图构建领域。

Juan-Antonio Fernández-Madrigal

西班牙 马拉加大学

José Luis Blanco Claraco

西班牙 马拉加大学

2012 年 4 月

致 谢

本书成书基于在机器人领域多年来持续的教学与研究工作,不仅仅是呈现在大家面前的文本,还包括开设的基于概率论的定位与地图构建的相关课程。我们这一领域持续的研究工作以及那些与机器人并没有直接关联的主题的相关文档,如数学和导航的历史等。所有这些都得益于我们的支持者、同事以及学生们的建议和帮助,而如果没有 IGI Global 的编辑们、不知名的审读者们以及对本书的早期版本进行审阅并提出宝贵意见的人们的帮助,本书不可能与广大的读者们见面,在此对帮助本书顺利付梓的每一位热心人,尤其是对 Francisco Ángel Moreno 和 Eduardo Fernández 所做的工作表示感谢。

Juan 在此要特别感谢马拉加大学与 Alfonso García-Cereze 教授一起工作的机械电子工程专业的几个硕士研究生小组,他们以本书的部分内容为教材进行了教学授课并积极地进行了反馈。如果没有 Juan Carlos Aznar、Mariano Jaimez、Ángel Martínez、Antonio Menchero、Andres San Millan 以及其他许多人提出的富有洞察力且十分积极的问题和建议,作者一个人是不可能确信本书相关章节在教学应用中的价值的。对于在一开始即采用本书的雏型进行课程学习的学生,尤其是 Eduardo Fernández、Ana Gago、Javier G. Monory 和 Raúl Ruiz,经历了本书部分内容测试版本的变换之苦,作者不会忘记他们所付出的努力与辛劳,时至今日,他们依然活跃在相应的研究领域中,这也说明他们曾经的工作给他们的带来了宝贵经验。

Juan 在 LEGO™ Mindstorms NXT 型机器人中采用了特定的定位与地图构建方法,Ana Cruz 博士对这一款机器人平台进行了教学性质的运用,这为相应方法的研究起到了不可替代的作用。她在 2008—2010 年期间主持的名为“基于 Lego Mindstorms NXT 型机器人的工程控制问题的创新研究”(编号 PIE-008)的教学研究项目所取得的成果在本书中有所提及,这一项目来源于马拉加大学的“Escuela Superior de Ingeniería Informática”以及系统工程与自动化系。

José 要向他有幸在各种学术会议和组织上遇见的来自全世界的学者们表达他的谢意,那些有趣的瞬间、鼓励的话语以及积极而充满意义的讨论都让人难以忘怀。尤其是要感谢 Paul Newman 博士,他在剑桥大学的实验室给了作者参观见学的机会,这使得作者在机器人相关领域的许多理论方法和技术以及视野都得到很大提升和开阔。同时对 Gabe Sibley 表示感谢,首先感谢他为本书撰写序言,其次感谢他为作者正确理解许多机器人领域的估计问题的概念指出了正确道路。

在此向全世界为移动机器人编程工具箱(MRPT)以各种各样的方式做出贡

献的研究人员们致以诚挚的谢意,无论是在我们马拉加大学的实验室内还是在其他地方,无论是提交了程序与补丁还是上报了 bug 报告,这些工作使得本书更具实践意义。本书中的许多图片和结果都基于该工具,而这些贡献者们极大地提升了这一有力工具的可靠性。特别感谢为 MRPT 的早期版本做出满怀热情工作的 Antonio J. Ortiz de Galisteo 以及在数学和几何学模型模块方面做出巨大贡献的 Pablo Moreno Olalla,附录 A 中的部分公式即源于此。

两位作者大部分的研究生涯都是在机器感知和智能机器人研究组(MAPIR)中度过的,该研究组对很多主题进行了大量且不可或缺的讨论并且能够进行即时的反馈,同时,也为我们从不同的侧面去看待从计算机感知到智能识别等领域的很多问题开拓了思路,这种看待问题的方式方法多年来已深深渗透到我们的研究方法之中。在此向该组织的固定成员,Vicente Arevalo 博士、Ana Cruz 博士、Cipriano Galindo 博士以及所有的博士研究生表示谢意。同时也向通过种种方式为我们的工作做出了不可替代工作的访问学者表示感谢,尤其是来自瑞典厄勒布鲁大学 AASS 研究中心的 Alessandro Saffiotti 教授、Achim Lilienthal 副教授以及 Amy Loufti 副教授。在此也要特别感谢研究组的首席研究员 Javier Gonzalez-Jimenez 教授,他同时也是两位作者的博士研究生导师,没有他的教诲与指导,我们不可能开始我们的研究生涯。

同时对为我们提供基金支持的公共组织表示感谢,尤其是当地政府部门 Junta de Andalucia,提供了一个研究项目使得 Juan 可以扩展其在概率机器人学方面的研究,尽管这与书中的定位与地图构建关系不大,同时也使得 José 能够进行基于移动机器人的天然气田的地图构建研究。这都为本书的成书提供了便利。除此之外,多个由欧盟和西班牙政府资助的基金项目多年以来为作者们提供了不可或缺的帮助,在此表示感谢。

书中使用的部分示例图片,来自于很多的研究人员和公司,他们允许在本书中使用这些图片。我们对图片拥有者们的无私贡献表示诚挚的感谢。同时,向那些公布了其积累的数据集以及程序源代码的研究人员们致以诚挚的谢意,这些使得本书在可实践性、可操作性方面得到极大丰富。

最后,也是最重要的一点是向我们的家庭成员们表示感谢。他们在我们的学生时代以及在我们学术生涯的艰难时刻一直给我们以关心和鼓励。最温暖的感谢献给我们的妻子,Ana 和 María,她们在我们撰写本书的日日夜夜给予我们无私无怨的支持与帮助。

目 录

第一部分 移动机器人同时定位与地图构建基础

第1章 绪论	2
1.1 总览	2
1.2 问题分类	6
1.2.1 空间几何基础	7
1.2.2 环境的动态与结构	8
1.2.3 机器人传感器	11
1.2.4 机器人的传动装置	13
1.2.5 先验知识	13
1.3 历史回顾	14
1.4 本书的组织	21
参考文献	24
第2章 机器人基础	29
2.1 引言	29
2.2 将机械变为机器人:传动装置	31
2.2.1 步行机器人	32
2.2.2 飞行机器人	33
2.2.3 水下机器人	34
2.2.4 轮式机器人	34
2.3 机器人看到的世界是什么样的? 传感器	36
2.4 本体感受传感器:内部传感器	37
2.5 外界传感器:接触或近距离传感器	39
2.6 外界传感器:单方向测距仪	40
2.6.1 基于三角测量的接近传感器	41
2.6.2 脉冲信号飞行时间(P-ToF)	41
2.6.3 连续波飞行时间(C-ToF)	43
2.6.4 小结	44
2.7 外界传感器:二维测距仪	45

2.8 外界传感器:三维距离传感器	48
2.9 外界传感器:纯距离传感器	49
2.10 外界传感器:图像传感器	50
2.11 外界传感器:空气分析传感器	51
2.12 环境传感器:绝对位置设备	51
2.13 能量供应	54
参考文献	55

第3章 概率论基础 60

3.1 引言	61
3.2 历史回顾	64
3.3 概率空间	69
3.4 随机变量	73
3.5 不确定性的形态	77
3.5.1 离散随机变量不确定性的形状	77
3.5.2 连续随机变量不确定性的形状	78
3.5.3 任何随机变量不确定性的形状:可能性	79
3.6 不确定性的总结	81
3.6.1 随机变量的矩	81
3.6.2 矩的一些重要定理	84
3.6.3 随机变量的信息和熵	86
3.7 多变量概率	87
3.7.1 联合概率和边缘化	87
3.7.2 相互独立和协方差	89
3.8 随机变量的变换	91
3.8.1 预备知识	91
3.8.2 两个连续的独立随机变量的和	93
3.8.3 连续独立随机变量的线性组合	93
3.8.4 连续独立随机变量的乘积与除法	94
3.8.5 一维连续随机变量的线性变换	94
3.8.6 多元随机变量的线性变换	94
3.8.7 卡方分布的特例	95
3.8.8 任意变换的近似	95
3.9 条件概率	97
3.10 图示模型	99

3.10.1	定义和分类	99
3.10.2	因式分解	101
3.10.3	贝叶斯网络的知识 and 推论	101
3.10.4	在 BN 和 D-分离中的条件独立	102
3.10.5	边缘分布	103
3.10.6	相关性图	104
附注		106
参考文献		108
第 4 章	统计学基础	111
4.1	引言	112
4.2	概率论和统计学之间的内容	113
4.2.1	几近收敛或者依某种概率收敛	114
4.2.2	依概率或测度收敛	114
4.2.3	依分布收敛	115
4.2.4	依范数或 Q -范数收敛	115
4.2.5	概率收敛和极限定理	116
4.3	估计量	121
4.4	估计量属性:样本的使用	122
4.4.1	完全性	122
4.4.2	充分性	123
4.4.3	鲁棒性	124
4.5	估计量的性质:收敛到实际值	124
4.5.1	一致性	124
4.5.2	偏差性	125
4.5.3	风险	126
4.6	估计量的属性:估计量的不确定性(方差)	126
4.6.1	最小方差	127
4.6.2	有效性	127
4.7	构建估计量:经典的估计量	127
4.7.1	有效估计量	128
4.7.2	最小方差,无偏估计量	128
4.7.3	最佳线性无偏估计量	129
4.7.4	最大似然估计量	129
4.7.5	最小二乘估计量	130

4.7.6 矩方法构建估计量	131
4.8 构建估计量:贝叶斯估计量	132
4.8.1 最小均方差估计	133
4.8.2 最大后验估计量	134
4.8.3 中间值估计量	135
4.9 估计动态过程	135
参考文献	139

第二部分 移动机器人定位

第5章 机器人移动模型	144
5.1 引言	144
5.2 匀速模型	147
5.2.1 运动学方程	147
5.2.2 概率运动模型	149
5.2.3 应用举例	152
5.2.4 三维情况的扩展	154
5.3 基于距离与方位的完整模型	155
5.3.1 运动学方程	155
5.3.2 概率运动模型	157
5.4 带有两个轮式编码器的非完整模型	160
5.4.1 运动学方程	160
5.4.2 概率运动模型	163
5.5 带有角编码器和轮式编码器的非完整模型	165
5.5.1 运动学方程	165
5.5.2 概率运动模型	169
5.6 用于商业机器人的黑箱不确定性模型	171
5.6.1 运动学方程	171
5.6.2 概率运动模型	172
5.7 备选模型:非运动运动模型	174
5.7.1 运动学方程	174
5.7.2 概率运动模型	175
5.8 基本运动模型的改进	176
附注	177
参考文献	178

第 6 章 传感器模型	179
6.1 引言	179
6.2 光束模型与光线投射	181
6.3 特征传感器:概率模型	184
6.4 特征传感器:数据关联	190
6.4.1 最近邻 DA 算法	192
6.4.2 联合兼容性分支定界 DA 算法	194
6.4.3 马氏距离与匹配的可能性	196
6.5 “地图”传感器	197
6.5.1 栅格地图匹配	198
6.5.2 点地图匹配	202
附注	203
参考文献	205
第 7 章 基于递归贝叶斯滤波器的移动机器人定位方法	207
7.1 引言	207
7.2 定位处理的参数化滤波器	211
7.2.1 卡尔曼滤波器	212
7.2.2 扩展卡尔曼滤波器	228
7.2.3 无迹变换和无迹卡尔曼滤波	233
7.3 定位处理的非参数滤波方法	239
7.3.1 离散贝叶斯滤波器	239
7.3.2 直方图滤波器	240
7.3.3 粒子滤波器	244
参考文献	255
第 8 章 移动机器人地图的类型和结构	259
8.1 引言	259
8.2 移动机器人空间环境的直观表示	260
8.2.1 栅格地图	261
8.2.2 基于点的地图	263
8.2.3 自由空间地图	264
8.2.4 特征或路标地图	265
8.2.5 关系地图和拓扑地图	267

8.2.6 象征地图和语义地图	270
8.3 栅格地图的贝叶斯估计	272
8.4 路标地图的贝叶斯估计:一般方法	277
8.5 路标地图的贝叶斯估计:距离-方位传感器	281
8.5.1 逆传感器模型	281
8.5.2 递归贝叶斯估计	282
8.6 路标地图的贝叶斯估计:纯方位传感器	283
8.6.1 逆向传感器模型	284
8.6.2 递归贝叶斯估计	287
8.7 路标地图的贝叶斯估计:距离传感器	288
8.7.1 传感器逆模型	289
8.7.2 递推贝叶斯估计	291
8.8 其他地图构建算法	291
8.8.1 点地图	292
8.8.2 连续马尔可夫随机场	292
8.8.3 位姿约束地图	294
参考文献	295
第9章 SLAM 的贝叶斯方法	301
9.1 引言	301
9.2 在线 SLAM:经典的 EKF 解决方法	308
9.2.1 算法描述	311
9.2.2 运算复杂性	317
9.2.3 不确定和终止环	318
9.3 完整 SLAM:基本 RBPF 解决方案	321
9.3.1 算法描述:RBPF 标准协议	324
9.3.2 批判性分析	326
9.4 完整 SLAM:强化 RBPF 解决方案	328
9.4.1 关于重要性权重	329
9.4.2 带地标的地图最佳建议分布(“快速 SLAM2.0”)	331
9.4.3 其他地图的最优可能分布	334
参考文献	336
第10章 先进的同步定位与地图构建技术	340
10.1 引言	341