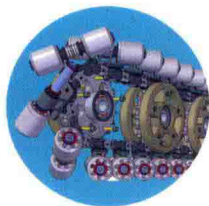


移动机器人导航与控制 算法设计

YIDONG JIQIREN DAOHANG YU KONGZHI
SUANFA SHEJI

张元良 著



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

江苏省重点建设学科“机械制造及其自动化”项目
江苏省高校自然科学研究面上项目(13KJB510003)

移动机器人导航与控制算法设计

张元良 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书主要论述了移动机器人导航系统和路径跟踪控制算法的设计方法。首先,基于常用的移动机器人导航系统的原理、所选用的民用单频 GPS 接收机数据的特点和航迹推算导航系统数据的特点,提出了三种 GPS 和航迹推算导航综合导航系统信息融合算法。这些算法利用 GPS 与航迹推算导航系统具有互补的特性,在解算负担小的基础上,能够很好地融合民用单频 GPS 接收机和航迹推算系统的导航信息,为室外移动机器人提供长期稳定、准确的导航信息。其次,介绍了移动机器人路径规划应用的蚁群算法。针对传统蚁群算法容易陷入早熟、收敛速度慢和生成路径转折多等问题,提出了相应的改进措施。改进后的蚁群算法在提高搜索速度的基础上,扩大了搜索范围,并且能够提供转折较少的路径。最后,基于模型算法控制方法和神经网络的模型算法控制方法为移动机器人设计了路径跟踪控制算法。

图书在版编目(CIP)数据

移动机器人导航与控制算法设计/张元良著. —武汉:华中科技大学出版社, 2016.12

ISBN 978-7-5680-2448-8

I. ①移… II. ①张… III. ①移动式机器人-研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 303591 号

移动机器人导航与控制算法设计

张元良 著

Yidong Jiqiren Daohang yu Kongzhi Suanfa Sheji

策划编辑:王 剑

责任编辑:张少奇

封面设计:原色设计

责任校对:张会军

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:8.5

字 数:170千字

版 次:2016年12月第1版第1次印刷

定 价:38.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

近些年来,移动机器人的应用领域越来越广泛。稳定和准确的导航系统是移动机器人完成任务的重要前提。GPS 是最常用的室外导航系统之一,随着 SA (selective availability)政策的取消,民用 GPS 的精度得到了大幅度的提高。但是民用单频 GPS 的误差依然在 10 米左右,使得其无法单独为移动机器人提供导航服务。航迹推算导航系统具有短期精度高的特点。但是其误差会不断累积。GPS 与航迹推算导航系统具有互补的特性,因此将二者进行融合组成综合导航系统是解决室外移动机器人导航问题的很好的方法。在得到了稳定的和准确的导航信息后,在很多的应用中常常需要进行路径规划。在栅格地图中进行机器人路径规划的方法有很多,各有其优缺点。如何能够在短时间内得到最优的路径是解决问题的关键,而路径跟踪控制问题是移动机器人控制领域的研究热点。轮式移动机器人具有非完整特性,即有轮子与地面为纯滚动而无滑动的约束条件。在设计轮式移动机器人路径跟踪控制系统时要考虑这些约束条件。

本书基于作者多年从事移动机器人导航和控制系统的研究成果,并参考了国内外相关的科技文献与资料,论述了基于民用单频 GPS 接收机数据特点所设计的 GPS/航迹推算综合导航系统,基于改进的蚁群算法设计的移动机器人路径规划算法,以及基于模型算法控制方法与神经网络模型算法控制方法设计的轮式移动机器人路径跟踪控制系统。本书内容主要包括概述、GPS/DR 室外移动机器人导航系统、移动机器人的路径规划、移动机器人路径跟踪控制共四章。在本书出版之际,向本书所引用的文献与资料的原作者以及支持和帮助本书出版的专家和同仁们表示由衷的感谢。

在本书的编著过程中,淮海工学院文西芹教授、赵明光教授对本书进行了审阅并提出了许多宝贵意见,淮海工学院刘青老师参加了资料收集和书稿整理,在此深表感谢。

特别感谢江苏省重点建设学科“机械制造及其自动化”项目、江苏省高校自然科学研究面上项目(13KJB510003)、青蓝工程和连云港市第五期“521 高层次人才培养工程”项目对本书的经费支持。

由于作者水平有限,加之时间紧迫,书中的疏漏和不当之处在所难免,敬请读者批评指正,并提出宝贵意见。

张元良

2016年6月

目 录

第 1 章 概述	(1)
第 2 章 GPS/DR 室外移动机器人导航系统	(7)
2.1 常用的机器人导航系统	(7)
2.2 GPS 定位导航	(12)
2.3 导航信息融合算法的设计	(29)
第 3 章 移动机器人的路径规划	(52)
3.1 A * 算法	(52)
3.2 蚁群算法	(56)
第 4 章 移动机器人路径跟踪控制	(77)
4.1 数学基础	(77)
4.2 模型算法控制(MAC)	(82)
参考文献	(122)

第 1 章 概 述

智能移动机器人是一个集环境感知、动态决策与规划、行为控制与执行等多功能于一体的综合智能系统^[1]。智能移动机器人系统中包含了电子技术、计算机技术、传感器技术、信息处理技术、自动化控制系统甚至人工智能系统等多学科的研究成果,是机电一体化的最高成就,也是当今研究的热点之一,在工业和农业生产中有着重要的地位。随着机器人性能不断地完善和功能不断地拓展,移动机器人的应用范围也大为扩展。现在,智能移动机器人在工业、农业、医疗、服务等行业中得到了广泛的应用,而且在城市安全、国防和空间探测领域中的有害与危险场合得到很好的应用。因此,移动机器人技术已经得到世界各国相关研究工作者的普遍关注。近些年来室外移动机器人得到了越来越广泛的关注和研究,其应用非常的广泛。移动机器人的研究始于 20 世纪 60 年代末期。斯坦福研究院(SRI)的 Nils Nilssen 和 Charles Rosen 等人,在 1966 年至 1972 年中研发出了取名 Shakey 的自主移动机器人^[2],其目的是研究应用人工智能技术在复杂环境下机器人系统的自主推理、规划和控制。室外移动机器人可以去执行很多危险的、枯燥的工作,在工业、农业、医疗、娱乐等方面有着很强的实用价值和应用前景。例如,“精确农业”是近年来国际上农业科学研究的热点领域,而农业移动机器人被认为是精确农业体系中不可缺少的一部分^[3]。在所有的应用中,能够准确地确定当前机器人的位姿以及提供准确的、长期可靠的导航信息成为了机器人完成其功能与任务的基本要求。

导航定位有多种技术途径。例如对于船舶导航技术来说,古老的海上定位方法是利用六分仪观测天体或陆地标志来推算船位,称为天文定位或地物定位。这些方法所测定的船位误差往往超过 1 海里。现代的导航定位系统有无线电定位系统、惯性导航系统、声学导航系统、卫星导航系统和综合导航系统等。无线电导航定位系统包括近程高精度定位系统和中远程导航定位系统。最早的无线电导航定位系统是 20 世纪初发明的无线电测向系统。20 世纪 40 年代起,人们研制了一系列双曲线无线电导航系统,如美国的“罗兰”和“欧米加”,英国的“台卡”等。惯性导航的原理是利用运动物体的加速度和位置坐标之间的数学关系,确定物体相对于地面的位置。比较常用的惯性导航系统主要包括惯性平台(安装了高精度陀螺仪、加速度计等仪器)、电子计算机和辅助设备。声学导航是利用水下声波的产生、传播、接收等特性进行导航定位^[4]的。多普勒导航仪就属于声学导航范围。其换能器向海底发射超声波脉冲,并接收从海底和水中散射层反射的回波,在脉冲频率分

析器中把反射脉冲与发射脉冲的频率进行比较,根据反射脉冲的多普勒频移就可得知运动方向和距离。卫星导航系统是发展潜力最大的导航系统。卫星导航是把卫星作为信号发射台,配置在移动机器人上的接收机接收卫星发射的信号,使用卫星导航接收机自动测量信号的多普勒频移,计算出移动机器人的地理位置。1964年,美国推出了世界上第一个卫星导航系统——海军卫星导航系统,又称子午仪卫星导航系统^[5]。目前,该系统已成为使用最为广泛的船舶导航系统。随着小型计算机和微处理机的出现,组合导航系统得到了发展。采用组合导航系统可以发挥各类分系统的优点来弥补各自的不足之处,通过特殊数字模型处理,定位精度和可靠性都得到了显著的提高。可以说是移动机器人综合导航系统的发展方向。

以上介绍的导航系统都有各自的优点,同时也都具有各自的不足之处。对于利用航迹推算系统进行移动机器人导航来说,该系统能够提供短时精确的导航定位信息,但是由于导航信息经过积分而产生,定位误差会随时间的增长而增大,所以长期导航精度差。也就是说航迹推算导航系统无法长期的单独为移动机器人提供精确的导航信息,其误差随着时间的增加而增加,而且是没有上限的。GPS 全球卫星定位导航系统具有全球覆盖、不受地球上任何地域的限制、全天候不受天气等条件的影响等优势。现今 GPS 得到了广泛的应用,如定位、导航、绘图、测量和授时等。对于室外导航应用来说,GPS 可以提供三维的位置和速度信息。在适宜的条件下,GPS 可以提供长期连续和相对准确的导航信息。到目前为止关于移动机器人和自主式车辆基于 GPS 的导航系统得到了广泛的研究^[6,7]。Seo 等为室外移动机器人提出了一种基于 GPS 和惯性导航系统(INS)的室外综合导航算法^[8]。文献[9]利用低精度的惯性传感器和 GPS 为移动机器人提供导航信息。在该应用中通过适当的抑制 INS 的误差可以提高该低精度 INS 的准确性。在文献[10]中,Adusumilli 等提出了一种基于随机森林回归模型的 INS 和 GPS 导航信息融合算法来为移动机器人提供连续和准确的导航信息。在 GPS 无法正常工作的情况下,该随机森林回归模型可以进行 INS 误差估算,从而保持了导航信息的连续性。文献[11]的作者提出了一种低成本的农用机械导航系统。该导航系统包括三个陀螺仪和两个罗盘,利用最小二乘法来估算系统倾角,同时通过与 GPS 的信息融合来进行方向和位置的估算。文献[12]将视觉导航系统和 GPS 导航系统相结合,提高了该综合导航系统的准确性和可靠性。该系统利用小波分析算法来减轻图像处理的计算量,提高视觉系统的准确性和解算效率。文献[13]中作者通过实验验证了一些以低成本的 GPS 接收机作为小型室外移动机器人导航传感器的可行性。实验的数据是在不同时间不同地点 GPS 接收机所采集的数据,通过对这些数据的分析和比较来进行相关的应用验证。文献[14]的作者利用 GPS 系统信号的反射和折射的统计特性提出了一种改善高大建筑物附近的移动机器人导航信息精度的方法——卡尔曼滤波技术,该技术用来估算 GPS 信号的时变偏移量。文献[15]的作

者通过一系列的实验验证了利用全球导航卫星系统 GNSS 对农业机器人提供精确导航信息的可行性。

随着美国的 SA 政策的取消,虽然民用 GPS 接收机的定位精度得到了大大的提高,但是民用的单频 GPS 接收机的误差依然很大,无法直接应用到移动机器人的导航中。基于实验数据,单频 GPS 接收机的误差在 20 m 左右^[16]。这么大的误差使得民用单频 GPS 接收机不适合单独为移动机器人提供导航信息。并且当机器人在通过高大建筑物附近或周围有高大树木时,由于 GPS 卫星信号的丢失会使得 GPS 的定位精度大幅度下降甚至无法正常工作,所以在这种情况下 GPS 也无法持续地为移动机器人提供导航信息。信号的反射和天上卫星不好的相对位置也会对 GPS 的定位精度产生不良的影响^[17]。实验结果表明,当 GPS 接收机所对接的卫星发生改变时,GPS 的精度也会下降。上述所有的因素都表明民用单频 GPS 接收机无法直接单独地为移动机器人提供导航服务,还需要其他导航传感器的辅助。差分 GPS(DGPS)的导航定位精度更准确,可以提供误差小于 1 m 的导航信息。文献[18]中作者提出了一种基于 RTK-DGPS 的室外导航系统。采用这种差分 GPS 接收机使得定位精度可以达到厘米级,但是 DGPS 的价格偏高,并且需要 GPS 基站提供差分信息。基于这些原因,将 GPS 和其他导航传感器的导航信息进行融合以提供连续稳定的、准确的导航服务,这成为了研究的热点。

航迹推算导航(DR)系统是一种经常被用于移动机器人导航定位的导航系统。该系统主要利用编码器、罗盘和陀螺仪等传感器得到机器人当前位置和方向等信息。DR 系统有高精度、快速反应时间和低噪声等优点。然而由于系统误差的存在,使得 DR 系统的误差会随着时间的增加而累积^[19],文献[20]的作者针对 DR 系统的系统误差做了详细的分析。一方面,虽然 DR 系统可以提供短期精确的导航信息,但是由于 DR 系统的误差会随着时间的增加而不断累积,因此不能单独使用其为移动机器人提供长期的导航服务;另一方面,虽然民用 GPS 接收机的精度比较低,反应时间相对慢,而且受到高噪声的影响,但是由于其导航信息不是通过前面导航数据积分而得到的,因此其误差不随着时间的增加而累积。因此将 GPS 和 DR 系统的导航数据进行融合以得到更稳定和准确的导航信息的方法得到了广泛的研究,出现了很多相应的信息融合算法。卡尔曼滤波技术在传感器数据融合中得到了广泛的应用^[21,22]。Chen 等综合了卡尔曼滤波技术与小波神经网络技术,提出了一种改善 GPS/INS 综合导航系统定位精度的信息融合算法,该算法可以在 GPS 无法正常工作时使得导航系统依然可以提供准确的导航信息^[23]。文献[24]中作者提出了一种 GPS 和低精度惯性导航系统的导航信息融合方法。该导航系统信息融合方法基于扩展卡尔曼滤波技术。该系统基于低精度的惯性导航系统和 GPS,应用人工智能思想来对 GPS 和惯性导航系统导航信息进行融合并得到了广泛的研究成果。大部分的人工智能方法考虑的是当前惯性导航系统的误差信

息,而不考虑以前的相应信息。文献[25]中作者利用输入时滞神经网络基于当前和前若干个采样时刻的惯性导航系统的位置和速度信息对惯性导航系统的位置和速度误差进行建模。该结果在 GPS 长时间处于无法使用时可以提供更加可靠的定位结果。文献[26]中作者利用自适应卡尔曼滤波技术来融合惯性测量单元和两个 RTK-GPS 接收机的导航信息,来为移动机器人提供三维的导航定位信息。通过分析,作者提出:综合一个 GPS 和惯性测量单元无法建立起一个可观测系统,而综合两个 GPS 接收机和惯性测量单元可以建立起一个局部可观测系统。这使得由于陀螺仪的漂移而产生的方向估算误差能被弥补。文中还提出了一种自调节滤波器,通过估算 GPS 的测量噪声来处理 GPS 系统无法正常工作时的情况。在 GPS 系统正常工作时,采用卡尔曼滤波技术来进行导航信息的融合。文献[27]中作者为城市中运行的大型机器人设计了一种综合导航系统。采用扩展卡尔曼滤波技术来融合全球导航卫星系统 GNSS 和惯性导航系统的导航信息。文献[28]中作者基于滚动时域卡尔曼有限脉冲响应过滤器提出了一种航迹推算导航系统和 GPS 导航信息融合方法。该滤波技术具有对系统模型误差、初始估算误差和未知偏差等因素鲁棒性强的优点,同时还降低了解算的难度。大部分传统的导航信息融合技术都是基于卡尔曼滤波技术的。卡尔曼滤波方法需要预先知道动态系统的模型。在大多数情况下非线性强的动态系统的建模是一项计算量很大的工作。文献[29]中作者利用人工神经网络系统强大的非线性系统建模的能力来进行 GPS 和航迹推算导航系统的导航信息融合。

卡尔曼滤波技术为导航系统信息融合提供了有力的工具。但是传感器误差模型的不准确、噪声问题和解算量大等问题是基于卡尔曼滤波技术的信息融合算法所需要解决的问题。具体来说卡尔曼滤波技术要求噪声为高斯白噪声,但是由于 GPS 的噪声源非常的多且复杂,因此 GPS 的噪声不可能是高斯白噪声。这使得基于卡尔曼滤波技术的导航信息融合算法的精度下降,在某些情况下甚至使得系统不稳定。解算量大也是这些算法所要面临的一个重要的问题。因此有必要针对民用单频 GPS 接收机的导航数据特点设计相应的导航信息融合算法。

一般来说,移动机器人是在一个已知的环境中工作或利用相应的传感器感知周围的环境然后进行工作的。在工作环境中会存在一些障碍物。一般情况下,移动机器人首先需要确定一条短的、安全的路径。有些时候,移动机器人对路径的要求不仅仅是长度最短,而且还需要考虑转角等其他因素。

移动机器人能够在工作环境中安全顺利地工作的前提是得到一条最优的路径。路径规划的主要任务是找到一条到达目标点的最优路径。随着移动机器人技术的不断发展,路径规划算法得到了广泛的研究^[30~32]。Rashid 等提出了一种可见二叉树算法来为移动机器人进行路径规划^[33]。该算法在考虑机器人与周围障碍物的可见切线的基础上构建所有的可行路径,这些路径组成了一个可见二叉树,

然后进行最短路径的寻找。Duchon 等基于栅格地图改进了著名的 A * 算法,为移动机器人进行路径规划^[34]。改进后的 A * 算法可以在更短的时间内得到最优的路径。Azimirad 和 Shorakaei 提出了一种两极分析进化算法进行最优路径的搜索^[35]。该算法基于间接开环最优控制思想和遗传算法。Dakulović 和 Petrović 为移动机器人路径规划应用提出了一种双向 D * 算法^[36]。该算法基于 Witkowski 规则,可以在二维栅格地图中进行路径优化。文献[37]中作者介绍了一种改进的 A * 算法。改进后的 A * 算法相对于传统的 A * 算法来说需要更少的节点,特别是当环境中存在形状复杂的障碍物时,从而减轻了算法的解算难度。文献[38]中作者基于粒子群优化算法为移动机器人在未知环境中提出了一种多目标路径规划算法。文献[39]中作者基于多神经元启发式搜索算法对传统的 A * 算法进行改进提出了一种在静态环境中进行移动机器人路径优化的算法。文献[40]中作者为多机器人系统提出了一种协同进化改进遗传算法,用于进行路径规划。该改进的遗传算法采用了新的遗传因子,从而改善了传统遗传算法局部最优解的问题,并且加快了系统的收敛速度。文献[41]中作者基于生态地理学理论提出了一种改进的粒子群优化算法。该算法可以在静态环境中为移动机器人提供全局最优路径。文献[42]中作者基于人工势场方法和细菌进化算法在动态环境中为移动机器人提供最优的路径。Espelosín 等基于粒子群算法考虑了在二维动态环境中进行移动机器人路径优化的问题^[43]。Huang 等基于细胞自动机和二型模糊逻辑提出了一种路径规划算法^[44]。文献[45]中作者提出了一种移动机器人路径规划的算法。首先基于人工蜂群算法进行局部的搜索,然后利用进化规划算法进行最优路径的提炼。文献[46]中作者在三维环境中基于 A * 算法提出了一种移动机器人路径规划算法。

当前,常用的路径规划方法有人工势场法^[47],模糊逻辑法^[48],A * 算法和神经网络法^[49]等。人工势场法可以提供一个安全的路径,但是该方法容易陷入局部最优解。在某些层面上来说,模糊逻辑法具有一定的智能性。模糊逻辑法的问题在于其缺乏自适应性,该方法仅对某类问题可以提供好的结果。A * 算法可以提供好的路径规划结果,但是在大的搜索环境下其效率比较低。A * 算法利用离线和在线学习神经网络具备了很强的学习能力和自适应性,但是如何得到最优的神经网络结构仍是个难题。而且如何训练神经网络也是一个必须解决的难题。

近些年来应用群体智能来解决路径规划问题的研究越来越多^[50~54]。蚁群算法经常被用于解决包括移动机器人路径规划在内的各种优化问题^[55~57],但是蚁群算法有容易陷入局部最优解和收敛速度慢等问题。虽然针对这些问题已经有了很多的研究结果,但是大部分仅是针对其中的一个问题取得的成果。

在得到了最优路径后,基于导航系统提供的导航信息,移动机器人完成任务时,通常需要跟踪事先设定好的路径。轮式移动机器人控制的两个主要问题是:如

何进行轨迹跟踪控制和点位控制。虽然点位控制问题在理论上很难解决,但是在实践中的应用并不广泛^[58]。轮式移动机器人的控制算法通常是在一个预先设定好的无障碍的路径的基础上工作的。因此,在实际上,轨迹跟踪控制问题得到了广泛关注。移动机器人的轨迹跟踪控制问题是控制机器人跟踪一个给定的、时变的轨迹。一般来说,其目的是使机器人能够在每一个采样周期上以特定的姿态到达预定的位置。

由于控制系统的设计难度和广泛的应用领域,轮式移动机器人路径跟踪控制问题得到了很多的关注^[59-61]。由于大多数的任务涉及跟踪一个事先设计好的安全路径,因此强大的路径跟踪能力对于移动机器人来说非常重要。

轮式移动机器人路径跟踪控制要比点位控制简单得多,这是因为在设计路径跟踪控制算法时假设轮式移动机器人的轮子与地面良好接触,运动时无滑动。这使得轮式移动机器人成为了一种非完整控制系统。轮式移动机器人路径跟踪控制问题已经成为了机器人领域的研究热点之一^[62~67]。文献[68,69]中作者提出了一种线性跟踪控制器。然而,该控制算法仅当机器人的线性速度不为零时才管用。这样当要控制机器人跟踪某一设计好的路径同时在某一特定点上停下来时,就很困难了。因此更多的非线性控制器被应用到该领域当中^[70~73]。Zenon 和 Marcin 的基于自校正设计,为轮式移动机器人提出了一种跟踪控制算法^[74]。Lim 等为非完整轮式移动机器人提出了一种非线性模型预测跟踪控制算法^[75]。Dinh 等为移动机器人提出了一种微分滑膜跟踪控制算法^[76]。在以上大部分的研究中是基于无扰动且轮子与地面无滑动的假设的。然而,实际上由于轮式移动机器人的速度和载重不同,有些情况下轮子与地面产生滑动是不可避免的,因此也有不少研究考虑了这种情况^[77,78]。

第2章 GPS/DR 室外移动机器人导航系统

机器人是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器^[79]。它既可以接受人类指挥,又可以运行预先编排的程序,也可以根据人工智能技术制订的原则纲领行动。它的任务是协助或取代人类完成工作,例如,在生产业、建筑业,或是其他有危险性的行业进行工作。机器人技术的发展主要有三个阶段。第一阶段为简单个体机器人,属于示教再现型。它只能死板地按照人给它规定的程序工作,不管外界条件有何变化,自己都不能对所做的工作做出相应的调整。如果要改变机器人所做的工作,必须由人对程序做相应的改变,因此它是毫无智能的。第二阶段为群体劳动机器人,对外界信息能够反馈,有一定的触觉、视觉、听觉。第三阶段为类人智能机器人,它不仅具有感知和理解周围环境的能力,而且还具有独立判断和行动的能力,并具有记忆、推理和决策的能力,因而能够完成更加复杂的动作。自主移动机器人属于类人智能机器人,是本体自带各种必要的传感器、控制器,在运行过程中无外界人为信息输入和控制的条件下,可以独立完成一定任务的机器人。它集环境感知、动态决策与规划、行为控制与执行等功能于一体,具有高度的自动化程度。其自主性主要体现在对环境的感知和理解、行为自主规划,以及自我学习和自我适应等能力方面。作为一种复杂的智能系统,自主移动机器人的研究涉及计算机视觉、模式识别、传感器及多传感器感知与信息融合技术、人工智能、自动控制等诸多学科的理论和技术,集中体现了计算机技术和人工智能的最新成果,在军事和民用方面显示出越来越广泛的应用价值。

2.1 常用的机器人导航系统

近几年,移动机器人技术得到飞速发展。随着它的应用领域越来越广泛,机器人被期望应用在偏远、危险的室外环境。特别是在变电站、化工厂等高温、高辐射和强干扰的场所中,代替人类进行全天候的作业。作为机器人在户外作业的基础,定位成了需要解决的首要问题。机器人需要精确地知道自身当前的位置,才能完成局部避障或是全局规划,这是实现其智能化的关键。所谓定位是指在结构化或非结构化环境中,机器人利用先验环境信息、机器人位姿的当前估计及传感器的观测值等输入信息,经过一定的处理和变换,产生更加准确的对机器人当前位姿的估计^[80]。根据定位方式和传感器的不同,一般可以把定位技术分为以下几个大类,即信号灯定位、基于地图的定位、路标定位、基于视觉的定位、航迹推算定位、无线

电定位、惯性导航、声学导航、卫星导航和综合导航等。

激光传感器是通过测距来定位的,激光传感器发射一个激光信号,根据收到从物体反射回来的信号的时间差来计算这段距离,根据发射激光的角度来确定物体和发射器的角度,从而得出物体与发射器的相对位置。近年来,激光传感器在移动机器人定位导航中的应用越来越广泛,这主要是因为激光传感器在距离测量方面具有高频率、高精度等优点。激光传感器所发射的扫描光束能够快速、大量、准确地获取周围环境的距离信息。此外,激光雷达是利用自主发射激光束的方式获取环境信息的,因此,不受环境光照变化、电磁干扰等因素的影响。然而,目前常用的激光传感器扫描的分辨率较低,在动态环境中噪声较大,在室外环境中的定位仍存在不足。

基于无线局域网的定位系统,是在一定的区域内安装适量的无线基站,根据这些基站获得的待定位物体发送的信息(如时间和信号强度等),并结合基站所组成的拓扑结构综合分析,从而确定物体的具体位置^[81]。这类系统可以利用现有的无线局域网设备,仅需要增加相应的信息分析服务器以完成定位信息的分析。无线局域网的网络速度与以太网相当,传输范围可达到几十千米,并且具有移动性高、保密性好的优点,因此它在机器人定位上也开始逐步使用。然而无线传感器网络较为密集,并且易受电磁干扰,节点的计算、存储和通信等能力也有限,这限制了其在室外定位中,尤其是在具有强电磁干扰的特殊环境中的应用。

视觉定位可以描述为运动载体通过视觉设备观察场景,再通过图像分析、目标识别等技术,计算载体在世界坐标系下的全局位姿,或是载体相对场景中特定参照物的局部相对位姿^[82]。目前基于视觉定位的室外移动机器人自定位的关键技术主要体现在路标选择、视觉系统选择、图像理解和分析、定位精度及实时性要求等方面。路标可分为两种:一种是自然路标,是直接从环境中提取的已存在的特征及物体;另一种是人工路标,是为了实现机器人导航和定位而人为放置在机器人工作环境中的标志物体。自然路标运用灵活,适合于需要高速运动的机器人(如智能车辆),但对路况要求严格,而且识别难度大,难以使用。人工路标适合于速度慢但对精度要求高的作业型机器人,它可以通过人为地设计和摆放路标,让机器人能够鲁棒、快速地识别出路标进行定位,因而得到了广泛的应用。图像理解和分析是整个视觉定位算法的核心。在室外环境下获取目标图像后,需要从中识别出用于定位的路标物。其难点在于如何选择合适的特征或结构代表图像信息,并对诸多环境不确定因素有较好的鲁棒性和不变性,同时满足实时性要求。目前常用的识别方法包括图像整体匹配和局部特征点匹配。视觉定位指标通常包括定位精度、实时性、工作环境、定位设备、应用场合等方面。根据不同的应用,需要使用不同的指标进行衡量,一般定位精度和实时性是两个主要的考核指标。定位精度是指用算法计算结果与实际位姿的偏差进行衡量,包括坐标误差和角度误差,受成像设备分辨

率和算法性能影响。实时性是算法处理一帧图像的时间反映,通常实时算法要求每秒处理 30 幅或以上图像。

惯性导航系统(INS)是一种不依赖于外部信息、也不向外部辐射能量的自主式导航系统,其工作环境不仅包括空中、地面,还包括水面。惯性导航系统的基本工作原理是以牛顿力学定律为基础,通过测量载体在惯性参考系中的加速度,将它对时间进行积分,且把它变换到导航坐标系中,得到在导航坐标系中的速度、偏航角和位置等信息。

惯性导航属于推算导航的一种。即从一已知点的位置根据连续测得的运载体航向角和速度推算出其下一点的位置,因而可连续测出运动体的当前位置。惯性导航系统中的陀螺仪用来形成一个导航坐标系使加速度计的测量轴稳定在该坐标系中并给出航向和姿态角;加速度计用来测量运动体的加速度,经过对时间的一次积分得到速度,速度再经过对时间的一次积分即可得到距离。

惯性导航系统有如下优点。(1)由于它不依赖于任何外部信息,也不向外部辐射能量的自主式系统,故隐蔽性好,不受外界电磁干扰的影响。(2)可全天候、全球、全时间地工作于空中、地球表面乃至水面上。(3)能提供位置、速度、航向和姿态角数据,所产生的导航信息连续性好而且噪声低。(4)数据更新率高、短期精度和稳定性好。

惯性导航系统有如下缺点。(1)由于导航信息经过积分而产生,定位误差随时间而增大,长期精度差。也就是说惯性导航系统无法长期的单独提供精确的导航信息,其误差随着时间的增加而增加,而且是没有上限的。(2)每次使用之前需要较长的初始对准时间。(3)设备的价格较昂贵。(4)不能给出时间信息。

惯性导航系统目前已经发展出挠性惯导、光纤惯导、激光惯导、微固态惯性仪表等多种方式。陀螺仪由传统的绕线陀螺发展到静电陀螺、激光陀螺、光纤陀螺、微机械陀螺等。激光陀螺测量动态范围宽,线性度好,性能稳定,具有良好的温度稳定性和重复性,在高精度的应用领域中一直占据着主导位置。由于科技进步,成本较低的光纤陀螺(FOG)和微机械陀螺(MEMS)精度越来越高,是未来陀螺技术发展的方向。我国的惯性导航技术近年来已经取得了长足进步,液浮陀螺平台惯性导航系统、动力调谐陀螺四轴平台系统已相继应用于长征系列运载火箭中。其他各类小型化捷联惯导、光纤陀螺惯导、激光陀螺惯导及匹配 GPS 修正的惯导装置等也已经大量应用于战术制导武器、飞机、舰艇、运载火箭、宇宙飞船等领域。如漂移率 $0.01^{\circ}/h \sim 0.02^{\circ}/h$ 的新型激光陀螺捷联系统在新型战机上试飞,漂移率 $0.05^{\circ}/h$ 以下的光纤陀螺、捷联惯导在舰艇、潜艇上的应用,以及小型化挠性捷联惯导在各类导弹制导武器上的应用。

GPS(global positioning system)是一种最常用的卫星导航系统。GPS 最初只是应用到军事方面的导航系统,现在已经广泛地民用了。GPS 导航系统需要天空

中至少要有 24 颗 GPS 卫星在工作。每颗卫星都连续地发送包含其当前位置和当前 GPS 时间数据的信息。每颗 GPS 通信卫星都是同步发射信号的, 当一个 GPS 接收机接收到某个卫星的信号后, 根据当前的时间和信号发送时的时间差就可以求出 GPS 接收机与该卫星之间的距离。GPS 接收机就是利用这个得到的伪距来计算自己的位置的。当一个 GPS 接收机同时接收到 4 个或更多的卫星的信号时, 就可以计算出其当前的位置, 请参看图 2-1。

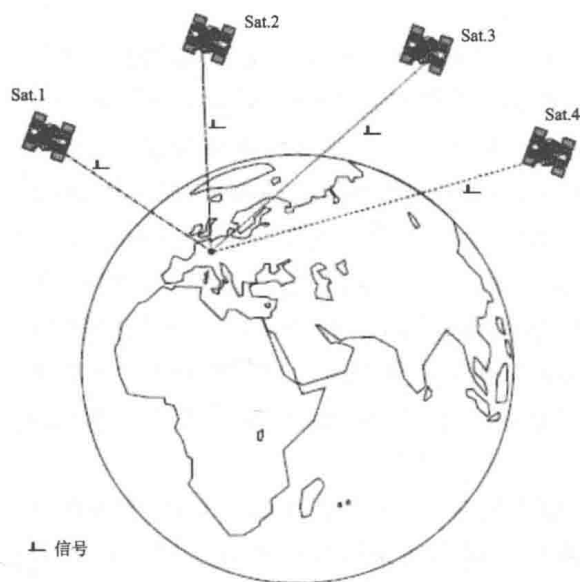


图 2-1 至少需要 4 颗卫星来进行三维定位

GPS、Galileo 和 Glonass 系统都是常用的卫星导航系统。GPS 以其定位精度高和覆盖范围广而得到了广泛的应用。在室外移动机器人导航中, GPS 接收机有时候会丢失卫星的信号, 这就导致导航精度的降低, 甚至会失去导航系统的可靠性。GPS、Galileo 和 Glonass 系统的结合使用可以使天空中可用的导航卫星得到大幅度的提高, 从而提高移动机器人导航的可靠性和精度。而且通过结合移动机器人自身的运动性能, 该系统可以进一步提高室外移动机器人导航的精度和可靠性。近些年来, 虽然美国取消了 SA 政策, 但是民用 GPS 的精度依然很低。所以关于提高 GPS 导航定位精度的算法得到了广泛的关注。很多学者提出了通过改善 GPS 数据解算的方法来提高 GPS 的定位精度。例如建立各种各样的 GPS 的误差模型来提高 GPS 的定位精度, 采用最小二乘法循环推算的方法来提高 GPS 信息解算的速度和精度, 以及利用 GPS 的载波相位与伪距定位相结合的方法来提高 GPS 的定位精度等。

差分 GPS 也称为 DGPS, 它可以将 GPS 的公共误差抵消, 例如卫星时钟偏差、星历误差、电离层误差、对流层误差等, 从而提高了定位精度。DGPS 的定位精度

很高,其定位误差可以达到 1 m,甚至更低。因此基于 DGPS 高定位精度的特点,很多学者提出采用 DGPS 对移动机器人进行导航。DGPS 有定位精度高、使用方便、可以全天候实时提供导航定位信息等优点,但是其价格非常昂贵,并且 DGPS 需要一个基站来为其提供差分信息。DGPS 的定位精度随着 GPS 接收机与基站的距离的改变而改变,而且当 GPS 接收机无法收到基站的差分信息时,DGPS 的精度会大幅度下降。更为重要的是,卫星信号的可用性取决于能否在一段时间内获得稳定的、从相同卫星发出信号的能力。在移动导航中,GPS 接收机定位精度通常受到卫星信号状况和道路环境的影响,同时还受到诸如时钟误差、传播误差、接收机噪声等诸多因素的影响,接收到的卫星信号可能是突发的、断续的。因此,单独使用 DGPS 无法长期稳定地为移动机器人提供准确的导航信息。有学者提出使用两个单频 GPS 接收机来实现 DGPS 的功能,从而节省了购买 DGPS 的花销,但是这需要两个 GPS 接收机能够同时使用相同的 GPS 卫星进行导航定位,在很多情况下无法满足这个条件。

综合导航系统是综合利用多种导航传感器,通过信息融合技术将来自多个传感器的导航信息进行融合,从而得到比任何一个单独传感器更精确和稳定的导航结果。综合导航系统的关键是导航信息融合技术。信息融合技术是近年来十分热门的研究课题,它结合了控制理论、信号处理、人工智能、概率和统计的发展。信息融合是指综合来自多个传感器的感知数据,以产生更可靠、更准确或更精确的信息。经过融合的多传感器系统能完善地、精确地反映检测对象特性,消除信息的不确定性,提高传感器的可靠性。经过融合的多传感器信息具有以下特性:信息的冗余性、信息的互补性、信息的实时性和信息的低成本性。对于 GPS 和航迹推算导航系统来说,卡尔曼滤波技术和扩展卡尔曼滤波技术是最常用的信息融合算法。但是卡尔曼滤波有其自身的局限性。卡尔曼滤波基于高斯白噪声的假设不符合 GPS 误差源的特点,使得卡尔曼滤波的效果不好,甚至会导致融合结果发散,从而使整个导航系统无法正常工作。并且,GPS 接收机存在无法接收到足够数目的导航卫星的情况。在这种情况下 GPS 将无法正常工作提供导航信息。卡尔曼滤波技术无法解决当 GPS 无法正常使用时导航系统的问题。

本书的一个主要内容是对室外移动机器人的导航系统的研究。航迹推算是常用的移动机器人的导航方法。这种方法可以提供短期的非常准确的导航结果,但是由于导航信息经过积分而产生,定位误差随时间的增大而增大,长期精度差。也就是说航迹推算导航系统无法长期地单独提供精确的导航信息,其误差随着时间的增加而增加,而且是没有上限的。GPS 导航系统是最常用的全球卫星导航系统之一,它可以提供准确的全天候的导航信息而不受时间空间和天气条件等的限制。虽然 SA 政策已经被取消,但是民用的 GPS 接收机的误差还是比较大的。DGPS 系统是可以提供非常精确的导航定位结果的,但是 DGPS 的价格非常昂贵,