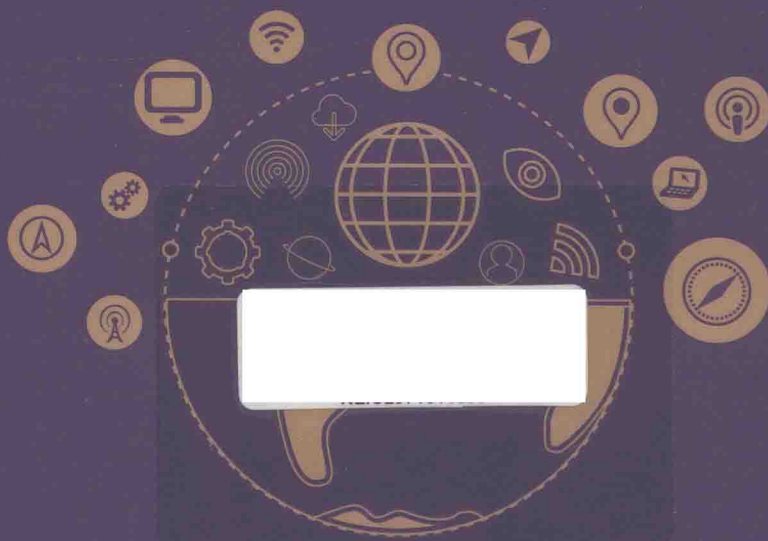


物联网

室内定位技术

徐小龙 编著



Indoor Positioning
Technology of IoT

物联网 室内定位技术



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

在神奇的自然界中,有很多生物都可以准确地到达很远的地方,它们依靠的就是定位。定位,即确定方位,无论对于人还是地球上的其他生物来说,都太重要了。

随着科学技术的发展,定位技术正在深刻地影响着人们生活的各个方面。本书主要介绍定位技术,重点是介绍室内定位技术,首先概述了位置服务与定位技术,介绍了位置服务定义、应用情况、历史背景、发展现状,介绍了定位技术的发展情况;接着介绍了衡量定位算法的主要性能指标、影响定位的主要因素,深入阐述了目前主流的定位算法,包括基于测距的定位算法和基于非测距的定位算法;最后详细介绍室内定位技术,在阐述室内定位技术前,本书也花了一定的篇幅介绍室外定位技术,包括基于卫星的室外定位技术、基于基站的室外定位技术和混合定位技术。

本书既可作为计算机科学技术学科、电子信息学科及信息网络专业的大学高年级学生、硕士及博士研究生教材,同样对从事移动计算、网络应用系统研究和开发工作的科研人员也具有重要的参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

物联网室内定位技术 / 徐小龙编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.8
(物联网开发与应用丛书)
ISBN 978-7-121-32372-0

I. ①物… II. ①徐… III. ①互联网络—应用—无线电定位②智能技术—应用—无线电定位
IV. ①TN95

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第183911号

责任编辑: 田宏峰

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17.5 字数: 448千字

版 次: 2017年8月第1版

印 次: 2017年8月第1次印刷

定 价: 68.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: tianhf@phei.com.cn。

FOREWORD

前言

定位，即确定方位，无论对于人还是地球上的其他生物来说，都太重要了。例如，经过训练的警犬可以通过嗅觉来确定毒品或者武器的位置，其他很多哺乳动物也可以在短距离范围内靠嗅觉定位；蝾螈、海龟等两栖动物也可以通过嗅觉也确定产卵水域的位置；信鸽可通过体内生物钟精确计算太阳位置，可以在远隔数百千米之外的陌生地方定位家的位置；很多迁徙的候鸟，在做长途飞行时都能利用地球磁场来进行定位和导航，保持其飞行路线不发生偏离；大马哈鱼能够穿越大洋返回自己原来孵化所在的同一条河流里产卵，其大部分旅程依靠太阳的位置、海流、地磁来定位和导航，最后到达淡水附近时，能根据河水的气味物质回忆起自己的出生地；蝙蝠、海豚等拥有基于超声波的声呐系统，通过“回声定位”来觅食、逃避敌害和求偶繁殖。

而对于生活在现代社会中的人们来说，确定自己及相关事物的位置也是至关重要的。事实上，除了通常我们一般所熟知的确定我们自身在地球上的位置外，仔细想想，广义的“定位”其实是无所不在的。我们再使用鼠标时，移动鼠标来寻找和点击屏幕上的图标，这难道不也是在定位吗？我们使用智能手机、平板电脑时，触摸屏也在通过电容、超声波或红外等方式来确定我们手指或者手写笔的位置。我们在用数码相机或智能手机来拍照时，也会通过激光、红外等方式进行对焦，而所谓对焦，也是在确定被摄主体的位置。

当然，本书重点还是在探讨人或物体在地球上的位置这一狭义范畴。随着对卫星定位和导航技术的不断深入，人们对基于位置的服务（Location Based Service, LBS）已不再陌生，其中最为人所熟知的最著名的 LBS 应用就是基于全球定位系统（Global Positioning System, GPS）的定位和导航服务。近十年来，无线通信技术、互联网技术及微电子技术的飞速发展使得智能手机、平板电脑等移动智能终端也得到了广泛的普及，基于 LBS 的应用也呈现了多样化发展的趋势。

根据定位应用中所应用的定位场景的不同，一般的定位技术可据此分为两种：室外定位和室内定位。在室外定位中，主要是利用卫星技术进行定位和导航的服务，其中应用最为广泛的的就是 GPS 技术，民用级 GPS 的定位精度在 15 m 左右。目前，随着我国北斗导航系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）的建设和迅速发展，BDS 已经与美国开发研制的 GPS、俄罗斯的全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GLONASS）以及欧盟的伽利略卫星导航系统（Galileo Satellite Navigation System, GSNS）一起，并称为全球四大卫星导航定位系统。

同时,随着城市化进程的加快,人际活动大多发生在室内场景中,人们对于 LBS 的需求也渐渐从室外延伸到了室内。由于卫星信号在有障碍物遮挡的情况下衰减严重,因而在高楼林立、结构复杂的城市间以及室内环境下定位精度很低,无法实现室内定位及相关的 LBS 服务,单纯的基于 GPS 的定位和导航已不能满足人们日益增长的室内 LBS 的需要。因此,定位技术,特别是室内定位和室内的 LBS 服务,已成为学术界和产业界的研发重点。在室内定位的研究领域中,早期的研究方向主要集中在 Wi-Fi 定位技术、移动蜂窝网络(Cell)定位技术、红外线(Infrared)技术、超声波(Ultrasound)技术、射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)定位技术等。由于通信技术和电子制造技术的不断发展,研究人员对低功耗蓝牙(Bluetooth Low Energy, BLE)技术、超宽带(Ultra Wideband, UWB)技术、传感器与无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)、计算机视觉技术、激光技术等新技术展开了研究,并将这些技术与定位和导航的研究相结合,提出了一些定位精度更高或能耗更低的定位和导航方案。

近年来,世界范围内的高校、研究机构以及各大 IT 企业巨头也都掀起了室内定位热:在国外,杜克大学对生活中的诸多“路标”进行研究,提出了 UnLoc 定位系统,美国苹果公司推出了基于 BLE 的 iBeacon 室内定位技术,美国谷歌公司推出了基于 Wi-Fi 技术的室内定位系统,芬兰的 IndoorAtlas 公司推出了基于纯地磁技术的室内定位应用;在国内,我国以北斗导航系统为基础,提出了适用于室内和室外定位的全天候的定位系统——“羲和”,清华大学刘云浩团队提出了 LiFS 定位系统,高德地图、百度地图也都相继推出了具体的室内定位地图和多种定位技术融合的室内定位应用等。城市化进程的加快和互联网的高速发展,使得人们在室内的活动时间越来越长,越来越多的人际活动都发生在室内场景中,室内定位和室内 LBS 的应用具有很大的潜力,值得深入地学习和研究。

随着互联网技术、物联网技术的大力发展,定位技术已不再局限于单纯的室外和室内导航领域,物流运输、仓储管理、医疗健康、重要物资监控、特种作业人员定位、消防救援等都需要高效的定位技术,并且上述的这些应用领域大多长时间都是处于室内场景中的。

目前的室内定位算法及技术在定位精确度、抗噪声能力、硬件成本及鲁棒性等方面仍有较大的提升空间,特别是在定位精度和设备成本开销之间总是难以取得一个良好的平衡。大多数室内定位机制仍然在使用单一的定位技术,如 Wi-Fi、RFID、ZigBee 等进行定位,并且对于单一技术的室内定位机制,仅以定位算法为切入点使得定位系统的定位性能得到提高十分困难。一种思路是以多种定位技术的融合定位为研究主题,从定位算法和定位模型两个方面为切入点,以提出多源数据融合的定位算法和定位模型,降低定位设备成本,降低定位误差,提高定位精度。

本书作者在移动计算、信息网络、位置服务、室内定位等技术领域已经有了多年的研究,具有扎实的理论基础和实践经验。本书的内容主要源于作者所领导的科研团队承担的国家自然科学基金、教育部专项研究基金、江苏省重点研发计划、江苏省高校自然科学基金等资助项目的研究工作和相关成果。

针对目前国内对室内定位技术的研究需求,本书取材国内外最新资料,是在认真总结

作者主持相关科研项目等相关科研成果的基础上，精心组织编写的。本书详细、深入地介绍了定位技术和位置服务的发展和应用现状、主流的定位算法、室外定位技术及室内定位技术，特别详细地介绍了我们自己提出的一系列室内定位领域的研究成果，集中反映了室内定位技术的新思路、新观点、新方法和新成果，具有较高的学术价值和应用价值。本书包含以下内容：首先概述了位置服务与定位技术，介绍了位置服务定义、应用情况、历史背景、发展现状，然后介绍了定位技术的发展情况；其次着，介绍了衡量定位算法的主要性能指标、影响定位的主要因素，深入阐释了目前主流的定位算法，包括基于测距的定位算法和基于非测距的定位算法；最后在阐释室内定位技术前，本书也花了一定的篇幅介绍室外定位技术，包括基于卫星的室外定位技术、基于基站的室外定位技术和混合定位技术。本书的重点是全面、深入地阐述室内定位技术，本书介绍了定位场景，然后分析了基于RFID、蓝牙、Wi-Fi、UWB、WSN等电信号的室内定位技术，以及基于地磁场、惯性传感器、超声波、红外线和视觉信息等非电信号的室内定位技术。本书最大的特色在于介绍了本书作者所领导的科研团队在室内定位领域的研究成果，包括基于方差修正指纹距离的室内定位算法、基于混合Wi-Fi热点室内定位算法、基于Wi-Fi和RFID数据融合的室内定位算法、基于惯性测量单元的多源定位模型等。

本书注意从实际出发，采用读者容易理解的体系和叙述方法，深入浅出、循序渐进地帮助读者把握室内定位技术的主要内容，富有启发性。与国内外已出版的同类书籍相比，本书选材新颖、学术思想新、内容新，体系完整、内容丰富，范例实用性强、应用价值高，表述深入浅出、概念清晰、通俗易懂。本书既可作为计算机科学技术学科、电子信息学科以及信息网络专业的大学高年级学生、硕士及博士研究生教材，同样对从事移动计算、网络应用系统研究和开发工作的科研人员也具有重要的参考价值。

参与本书编写的还有唐瑀、王屹进、戎汉中、袁豪、张雷、杨春春，本书融合了项目团队相关研究人员的研究成果。此外，本书还引用了国内外研究人员的诸多研究成果以及网络上的相关资料，在此一并衷心感谢！

由于编写时间仓促，加上作者水平有限，书中的错误及不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2017年7月

CONTENTS 目录

第 1 章 ▶ 定位与位置服务	1
1.1 定位需求	1
1.1.1 自然界的定位	1
1.1.2 生物定位类型	5
1.1.3 生物定位应用	10
1.2 现代定位技术	11
1.2.1 人类定位需求	11
1.2.2 光学定位	11
1.2.3 焦点定位	13
1.2.4 触摸屏定位	14
1.2.5 声波定位	17
1.2.6 磁场定位	19
1.3 位置服务	23
1.3.1 位置服务的定义	23
1.3.2 位置服务的应用	23
1.3.3 应急救援应用	24
1.3.4 位置服务推荐	24
1.3.5 城市物流配送	25
1.3.6 城市共享单车	27
1.3.7 社交娱乐	28
1.3.8 室内定位	29
1.3.9 室内定位应用案例	31
1.4 本章小结	33
参考文献	33
第 2 章 ▶ 常用定位算法	36
2.1 定位评价标准	36
2.1.1 均方误差	37
2.1.2 均方根误差与克拉美罗下限	37
2.1.3 圆误差概率	38

2.1.4	几何精度因子	38
2.2	影响定位的主要因素	40
2.2.1	非视距传播	40
2.2.2	多径传播	42
2.2.3	其他电子设备信号干扰	42
2.2.4	移动终端定位时的位置	43
2.3	基于测距的定位算法	43
2.3.1	基于 TOA 的定位	44
2.3.2	基于 TDOA 的定位	52
2.3.3	基于 RSSI 的定位	64
2.3.4	三边定位法	64
2.3.5	三角定位法	65
2.3.6	最大似然法	65
2.4	基于非测距的定位算法	67
2.4.1	近似法	67
2.4.2	Centroid (质心定位) 算法	67
2.4.3	APIT 算法	69
2.4.4	凸规划算法	69
2.4.5	APS 定位算法	70
2.4.6	位置指纹算法	72
2.5	本章小结	75
	参考文献	75
第 3 章 室外定位技术		80
3.1	定位场景	80
3.2	定位技术	87
3.2.1	卫星定位技术	87
3.2.2	基站定位技术	100
3.2.3	混合定位技术	105
3.2.4	量子定位技术	112
3.3	本章小结	113
	参考文献	114
第 4 章 室内定位技术		117
4.1	定位场景	117
4.2	无线信号定位	119
4.2.1	RFID 技术	120
4.2.2	WLAN 技术	122
4.2.3	蓝牙技术	124

4.2.4	UWB 技术	125
4.2.5	WSN 技术	127
4.3	非电信号定位	129
4.3.1	地磁场技术	129
4.3.2	惯性测量技术	133
4.3.3	超声波技术	135
4.3.4	红外线技术	136
4.3.5	视觉信息技术	137
4.4	本章小结	140
	参考文献	140

第 5 章 方差修正指纹距离室内定位 145

5.1	问题分析	145
5.2	基于方差修正指纹距离的室内定位算法原理	157
5.2.1	指纹距离定义	157
5.2.2	测量误差计算	162
5.2.3	修正权重计算	162
5.3	算法流程	163
5.3.1	离线阶段	163
5.3.2	定位阶段	163
5.4	VFDA 算法优化	165
5.5	实验验证与性能分析	167
5.5.1	性能指标	167
5.5.2	实验环境	167
5.5.3	实验验证与分析	169
5.6	本章小结	172
	参考文献	173

第 6 章 混合 Wi-Fi 室内定位 175

6.1	问题分析	175
6.1.1	RSSI 测距定位方案	176
6.1.2	运动预测模型	178
6.1.3	基于运动状态改进的 RSSI 定位算法	179
6.1.4	混合定位技术	181
6.2	基于混合 Wi-Fi 热点定位算法原理	190
6.2.1	定位场景	190
6.2.2	基于混合热点定位算法	192
6.2.3	算法流程	195
6.3	实验验证与性能分析	197

6.3.1	性能指标	197
6.3.2	实验环境	197
6.3.3	实验验证与分析	198
6.4	本章小结	201
	参考文献	201

第7章 Wi-Fi+RFID 数据融合室内定位 203

7.1	问题分析	203
7.2	定位场景分析	209
7.3	基于 Wi-Fi 和 RFID 数据融合的室内定位算法	211
7.3.1	基于奇异值判定的卡尔曼滤波器	211
7.3.2	KILA 室内定位算法	214
7.4	实验验证与性能分析	217
7.4.1	实验环境	217
7.4.2	实验验证与分析	218
7.5	本章小结	220
	参考文献	220

第8章 IMU 多源定位 223

8.1	问题分析	223
8.2	行人定位识别场景分析	227
8.2.1	相对姿态校准	228
8.2.2	行人步态识别	231
8.2.3	行人步长识别	236
8.2.4	行人定位算法	242
8.3	基于惯性测量单元的多源定位模型算法原理	247
8.3.1	定位地标	255
8.3.2	指纹地图	256
8.3.3	条件随机场模型	259
8.4	实验验证与性能分析	263
8.4.1	实验环境	263
8.4.2	实验验证与分析	264
8.5	本章小结	265
	参考文献	266

第 1 章

定位与位置服务

1.1 定位需求

1.1.1 自然界的定位

有人做了一次实验^[1]：在威尔士海岸斯科克霍姆岛上将一只墨嘴海鸥从它的巢里抓了出来，到了 5000 km 以外的波士顿又放了它。12 天以后它又回到了自己的巢中，居然比告知放飞消息的信件还早到了一天。而北极燕鸥每年往返于地球的南极和北极之间，维基百科指出北极燕鸥的迁徙旅程约 38000 km（见图 1.1）。人们至今还无法明确知道动物是怎样克服这么长的危险路程安全返回的，也许有的依靠陆地上明显的标记，有的依靠特殊的音响感受器或磁场感受器。下面就介绍几种动物独特的定位本领。

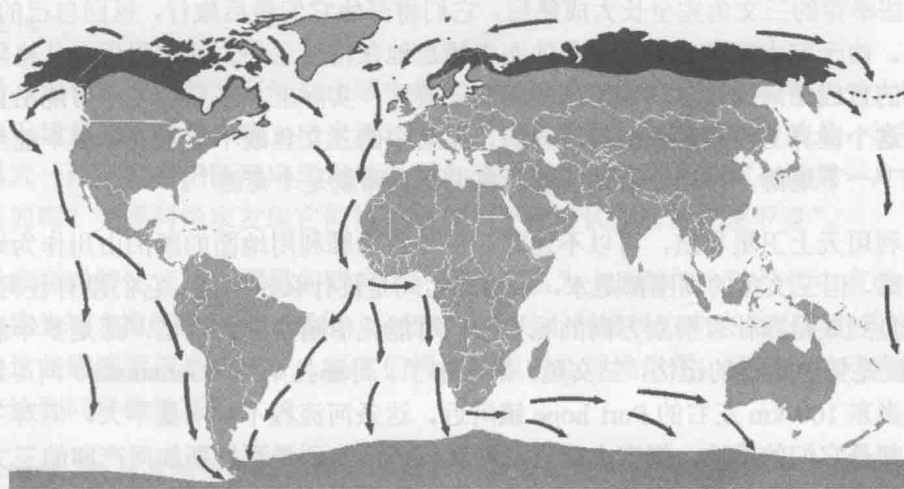


图 1.1 北极燕鸥的迁徙路线图^[2]

大量哺乳动物在短距离范围内主要靠嗅觉定向^[3]。嗅觉也帮助蝾螈和其他两栖动物找到产卵的水域，让海龟游到数千米外可以产卵的海滩。大马哈鱼穿越大洋返回到自己原来

孵化出来的同一条河流里产卵，其大部分旅程依靠太阳的位置、海流以及依靠它的磁觉，最后到达淡水附近时，它能根据河水的气味物质“回忆”起自己的出生地。

大家都知道信鸽具有卓越的航行本领，它能从 2000 km 以外的地方飞回家里。实验证明，如果把一块小磁铁绑在鸽子身上，它就会惊慌失措，立即失去定向的能力；而把铜板绑在鸽子身上，却看不出对它有什么影响。当发生强烈磁暴的时候，或者飞到强大无线电发射台附近，鸽子也会失去定向的能力。这些事实充分说明了，鸽子是靠地磁场来导航的^[4]。同样大海中的绿海龟是著名的航海能手，每到春季产卵时，它们就从巴西沿海向坐落在南大西洋的沧海森松岛游去，这座小岛全长只有几千米，距非洲大陆 1600 km，距巴西 2200 km；但是，绿海龟却能准确无误地远航到达。产卵后，夏初季节，它们又渡海而归，踏上返回巴西的征途。有据研究表明，绿海龟也是利用地磁场进行导航的^[5]。

对大多数人来说，三文鱼就是餐桌上盘色彩艳丽、味道鲜美的佳肴，至于它们是怎么在这个世界上生活的，怕是了解的人不多。其实这也难怪，虽然今天人类科技水平相当发达，但人类对三文鱼的习性的掌握还相当初级。例如，成年三文鱼是根据什么来寻找它们当年的出生地这个问题，目前的学术界还只能笼统地猜测它们是根据水中的气味来辨别方向的。对三文鱼的研究之所以困难，最主要的原因还是因为三文鱼属于回游鱼类的缘故。三文鱼的一生大致经过三个阶段，第一阶段，三文鱼从鱼卵变成小鱼苗后要在淡水中生活一段时间才会游向大海，这段时间的长度并不固定，有的三文鱼在成鱼一年后便离开自己的出生地，但有的三文鱼却会在淡水中生活很久，加拿大魁北克地区就曾发现过在淡水中生活 8 年后才游到海中的三文鱼。在这一阶段，估计有 40% 以上的三文鱼苗会被其他捕食者吃掉。海水中的三文鱼，是其一生中身体成长的最重要阶段，它们在短时间内变得又大又肥。但在辽阔的大海里，三文鱼的安全也得不到保障，海豹、格陵兰鲨、银鳕鱼，还有我们人类，都将三文鱼视作美餐，这一阶段大约 70% 的三文鱼被吃掉。在海洋中生活 1~4 年，当那些幸存的三文鱼完全长大成熟后，它们将开始它们最后旅行，返回自己的出生地，产卵繁殖。由于安大略湖水域三文鱼的海中栖息地在格陵兰岛大陆架附近，从格陵兰岛游到多伦多的直线距离比哈尔滨到广州的距离还要远，实际上，三文鱼是不可能沿直线游行的，因为这个世界上没有哪条河是笔直的。旅途中的三文鱼既不能乘火车更不能坐飞机，就那么一下一下地游，路途遥远先不谈，单说不迷路就是个奇迹^[6]。

人类利用天上卫星导航，可以不迷路，南飞的大雁利用地面的湖泊山川作为地标，也可以不迷路，但三文鱼的周围都是水，水与水之间是没什么不同的，它们没有任何参照物，那么三文鱼到底是靠什么辨别方向的呢？它们可能凭借脑海中的记忆，那是多年前儿时的记忆，但就是凭着这样的记忆，三文鱼，游回来了。哥那拉斯加（Ganaraska）河（见图 1.2）位于多伦多东 100 km 左右的 Port hope 镇附近。这条河流程不长水量不大，但对三文鱼来说，这里却是它们的圣地。据安大略省资源厅统计，来到哥那拉斯加河产卵的三文鱼数量要大于从哥那拉斯加游向大海的三文鱼的数量，这说明，一方面加拿大三文鱼的生存环境正在改善，鱼类数量整体在增加；另一方面也说明，很多不是出生在哥那拉斯加河的成年三文鱼却来到这里产卵^[6]。

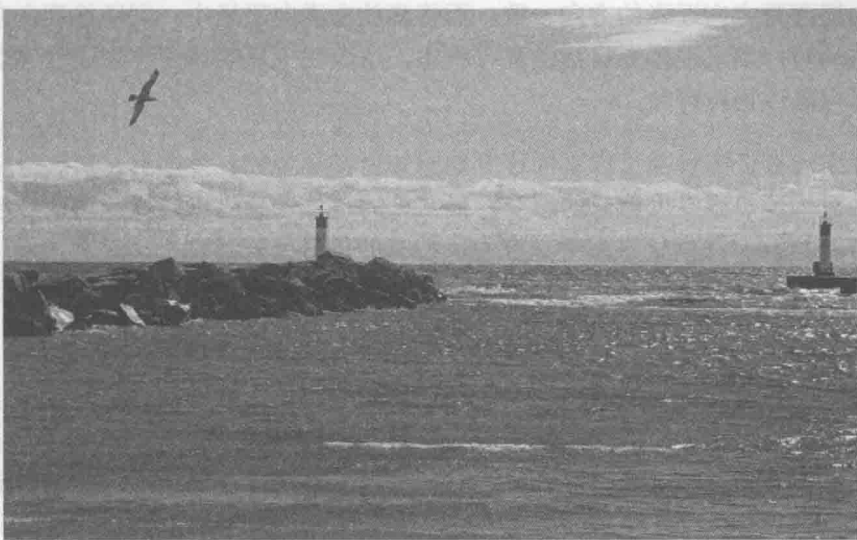


图 1.2 哥那拉斯加河

两座灯塔之间，就是哥那拉斯加河的入湖口。与浩瀚的安大略湖相比，这个入湖口可能连针鼻大小都赶不上。但哥那拉斯加河的三文鱼，都是从这个狭小的湖口游进来的，它们是怎么找到这儿的呢？

目前的解释是，水中的鱼儿能在波涛汹涌的海洋中按一定的方向去导航。这比鸟的迁途能力更为奇特。海水是导电的，当它在地球的磁场流动的时候就产生电流。于是，鱼儿便利用这个电流信号，灵敏地校正自己的航行方向^[6]。还有人对鳗鲡进行了细致的观察，初步发现，鱼脑能对微弱的电磁场做出反应，地磁场是对鳗鲡提供信息源。因此，美洲的鳗鲡习惯于航行很长的距离后到达产卵场所，产卵后又返回它们原来的“基地”。

同样，还有远在加勒比海沿岸水域生活着一种形体较大的节肢类动物——大螯虾，这种动物白天栖息在暗礁中，晚上出来活动觅食。让科学家感到迷惑不解的是，这种动物在离开其巢穴一段距离后仍能准确无误地找到自己的巢穴。它们是如何在漆黑一片的大海中找到归途的呢？美国科学家发现它们体内生有一个能辨认方向的“磁罗盘”。

科学家在对赞比亚地下鼯鼠的研究中，发现在名为上丘脑的大脑结构中有些神经细胞是这种动物生物“指南针”的一部分。这些细胞组对不同磁场方向会做出有选择性的反应。鼯鼠利用这些磁感觉信息合成了一幅它们周围环境的心理地形图，而其他的动物用不同感官信息来达到同样的地形图。

每年深秋，数百万的王斑蝶都要从美国和加拿大的栖息地迁徙到墨西哥中部山区越冬，行程可达 3200 km，堪称昆虫迁徙距离之最。但这些王斑蝶却是前一年春季自墨西哥返回到北美等地区的王斑蝶后代，从未飞到过墨西哥，它们靠什么认路呢？人们曾经认为这些蝴蝶以太阳作为指南针来导航，但在乌云蔽日的天气中它们照样迁飞。研究人员在实验室中对秋季王斑蝶进行测定发现，将王斑蝶放在正常的磁场中，它们朝西南方向飞行，与从

美国东部向墨西哥方向迁飞的方向一致。而将其放在逆向磁场中，则纷纷朝向东北方向迁飞。撤掉磁场时，则呈现漫无目标的乱飞状态，这表明王斑蝶体内存在磁性物质，其迁飞方向也与体内磁性物质有关。

动物界中还有许多种类可以不同程度地感知所在环境的红外辐射，对红外辐射的感知通常表现为对环境热源温度信息的感受，最常见的是体表感温以选择或适应环境。而蝮亚科蛇类（Crotalinae）在演化过程中，产生了特有的信号接收器官——颊窝，进化出专用的红外感知系统，对温度信息有着极高的灵敏度和精确度，甚至达成类似视觉的目标识别与定位功能。

蝙蝠是唯一有飞行能力的哺乳动物，经过长期的演化，其结构和功能达到了一种完美的高度。现分布于世界各地的蝙蝠均属于哺乳纲（Mammalia）翼手目（Chiroptera）。根据其形态等，可进一步分为大蝙蝠亚目（Megachiroptera）和小蝙蝠亚目（Microchiroptera），前者除果蝠（Rusettus）属外，均不使用回声定位；后者则都具有回声定位能力，而视觉系统相对原始，故将它们称为回声定位蝙蝠（Echolocatingbat）^[2]。

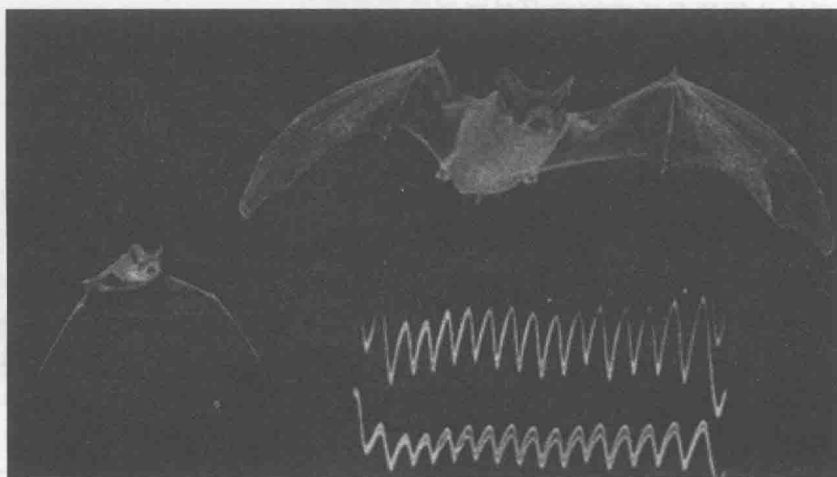


图 1.3 蝙蝠超声波定位

科学家曾在 16 只座头鲸身上安装了跟踪设备，然后利用卫星技术进行跟踪。这些座头鲸从南大西洋和南太平洋向北游了数千千米，偏离洄游路线不会超过 5° 。人们一直认为很多动物在进行远距离迁移时利用地球磁场或太阳方位进行导航。但科学家表示，这两种方法都无法解释座头鲸如此超凡的导航能力，因为地球的磁性变化太大，无法解释座头鲸的直线洄游，而在水里也无法找到太阳导航所需的参考点。他们因此怀疑座头鲸采用了一种组合导航的方式^[9]。

研究动物的超级感知能力，不但可加深我们对大自然的理解以便更好地保护生物多样性，还可以为工程设计提供新灵感、新原理和新材料，这在国家安全、公共安全、工业检测、医学检验等领域都有极广阔的应用前景。

1.1.2 生物定位类型

定位无处不在，在自然界中的动物具有某些人类所没有或超越人类的感知能力。例如，夜行性的肉食动物狼、猫和鸮等有超强的夜视能力；一些昆虫、鱼类和鸟类可以看见紫外或偏振光；少数昆虫、蛇类和蝙蝠可以感知红外辐射；多数蝙蝠和海豚可以听到超声波并借此回声定位；大型动物如鲸类和大象可以听到次声波；部分鱼类、鸟类和海龟借助地磁导航和定向；电鱼可以感知水体的电场变化；鳞翅目昆虫几乎可以检测空气中的单分子信号^[8,9]。

1. 红外感知

强大的红外感知系统使蝮蛇在夜间或洞穴等黑暗环境下，可以有效地捕捉小型哺乳类和鸟类等温血动物（见图 1.4）。蝮蛇的捕食行为与视觉、红外觉、嗅觉、震动感知等神经系统密切相关，具体到对活体猎物的识别与定位，又特别依赖于视觉与红外觉两个系统。自然环境中，亮度、温度、地形等因素是多变且不可控的，因此，通过两个不同的感知系统对猎物进行识别和定位，其可以有效起到互补作用，其捕食的时间和空间得到了拓展，从而提高捕食效率。

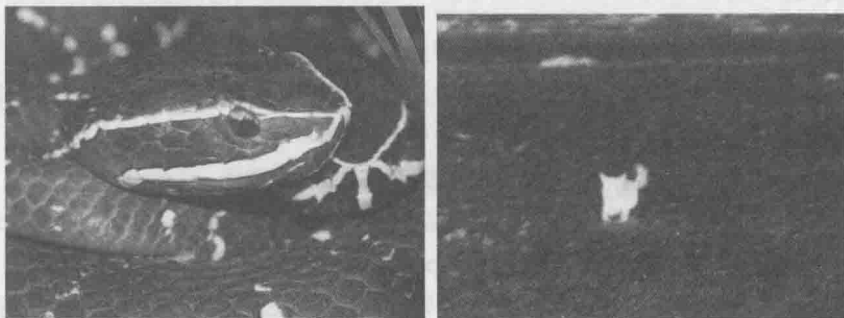


图 1.4 蝮蛇红外视线中的动物

与视觉系统类似，蝮蛇的红外感知系统可以根据接收、信号传导、编码还原的信息处理步骤分为 3 个结构部分。颊窝是蝮蛇的红外信号接收器官，是蝮亚科蛇类具有红外感知能力的物理基础。带有空间和温度信息的能量辐射到颊窝膜的外表面，激活了分布于膜中的感受单元——三叉神经末梢（TNM），完成了外部热量信息向神经电信号的转换。随后，神经电信号经三叉神经节传递至中枢神经，在中脑视顶盖下层区域进行空间编码处理，并在此与视觉信息进行整合，最后到达端脑进行判断与决策。

2. 回声定位

尽管回声定位蝙蝠种类繁多，其实可根据它们发出的回声定位信号模式大体上归为 3 类：即恒频-调频（Constant Frequency-Frequency Modulation, CF-FM）蝙蝠，如胡须蝠（*Pteronotus parnellii rubiginosus*）等，其发声信号由一段较长时程的 CF 成分后接续一段较短时程的下扫 FM 成分所构成；调频（FM）蝙蝠，如大棕蝠（*Eptesicus fuscus*）等，其发

声信号为下扫 FM 声；咔哒声 (Click) 蝙蝠，如大蝙蝠亚目的果蝠 (Rousettus)，其发声信号为时程极短 (40~50 μs) 的调频声，带宽可达 80 kHz。

人们对蝙蝠回声定位的认识，从 1793 年意大利生理学家 Spallanzani 发现盲眼蝙蝠能自由飞行开始，到 1938 年 Griffin 成功地记录到蝙蝠发出的超声，100 多年的历程才最终揭开“蝙蝠是通过主动发出声音信号，并听其回声来感知周围环境”的千古之谜，Griffin 于 1944 年提出将自然界中利用类似声呐原理探测周围环境的过程称之为回声定位 (Echolocation)。至此，蝙蝠研究进入了一个全新的时代。

蝙蝠的回声定位系统主要由发声系统、听觉系统和运动系统所组成。不同模式的回声定位信号，在回声定位方面有不同特点，如 CF 信号和 CF-FM 信号中的 CF 成分最适宜传递目标速度信息；而 FM 信号和 CF-FM 信号中 FM 成分最适宜传递目标特征和距离信息。飞行过程导致的多普勒频率漂移 (Doppler Shift) 不但能传递与蝙蝠相对飞行速度有关的信息，而且还能传递有关昆虫翅振 (Wing Glint) 信息。回波的振幅能传递目标 (Target) 大小信息，回波延迟时间可传递靶物距离信息，回声成分频率的振幅和 FM 成分的变化能传递有关目标质地等信息，回声到达两耳间的时间差、频率差乃至相位差可提供目标的经向 (Azimuth) 方位信息，而每只耳的外耳产生的声波干涉图景可提供目标的俯仰方位信息。

在神经解剖学结构研究方面，发现与回声定位相关的结构高度特化，显示出蝙蝠听觉系统对回声定位的适应。

- CF-FM 蝙蝠耳蜗基底膜对回声定位信号主频异常敏感，形成所谓“听觉中央凹 (Auditory Fovea)”；
- 中脑下丘增大，某些结构出现分化；
- 腹前耳蜗核 (Anterior-Ventral Nucleus of Cochlear Nucleus, AVCN) 极度增大，甚至在 CF-FM 蝙蝠的 AVCN 边缘区出现一群大而独特的多极神经元；
- 从腹后耳蜗核 (PVCN) 到上橄榄复合体 (SOC) 存在直接输入，明显地有别于其他哺乳类动物；
- 在胡须蝠的内侧上橄榄核 (MSO)，与非回声定位哺乳动物相比，其神经元仅接收来自对侧 AVCN 的单耳输入，这可能更有利于精确地处理耳间时间差 (ITD)；
- 外侧丘系核 (Lateral Lemniscus) 的腹侧核和中间核显示出异常增大和超常结构。

另外，近期的一项脑核磁共振成像和组织学比较研究显示，使用 CF-FM 和 FM 声脉冲进行回声定位的蝙蝠要比啮齿类 (大鼠和小鼠) 有更大的耳蜗和更多的转数 (Turns)，这些差别与它们所发出的生物学相关的声信号及听觉行为相关。

在听觉细胞的功能和机制研究方面，在近 40 多年来，被认为对以下诸方面给予了强烈的关注，如：

- 回声延迟 (Echo-delay) 或靶物距离 (Target Range) 调谐；
- 听觉神经元的频率调谐与“听觉中央凹 (Auditory Fovea)”；
- 皮质功能组构的模块性 (Modularity)；

- 神经元反应潜伏期的动态性;
- 声刺激的时程调谐;
- 目标选择性神经元与尺度 (或大小) 不变性 (Scale invariance)。

此外, 还值得关注的是在蝙蝠听觉调控方面, 发现既有同一中枢内细胞间的调控, 也有不同中枢间的调控, 还有高位中枢对低位中枢的所谓离皮质调控。自 20 世纪末以来, 在大棕蝠和胡须蝠上发起了一系列有关离皮质调控研究, 证实了蝙蝠脑内存在对听觉输入精细的离皮质调控机制。这种机制对皮质下中枢对听觉输入产生更精准的反应, 以及在成年后为适应环境而形成听觉可塑性, 提供了一种结构和功能的保障。人和动物的行为总是处于神经系统的控制之下, 对听觉系统怎样加工人和动物行为相关的复杂声信号, 所知甚少。近年来, 在大蹄蝠 (*Hipposideros Armiger*) 和普氏蹄蝠 (*Hipposideros Pratti*) 上用模拟的回声定位声信号进行研究, 获得了某些新的认识, 发现听觉中脑一下丘神经元对这种行为相关 CF-FM 声信号以特异性的模式来反应, 呈现出 Single-On (SO) 和 Double-On (DO) 反应模式, 但对纯音和 FM 刺激未见有反应模式的差异。进一步研究还发现, 这两类神经元在潜伏期、恢复周期, 以及所占比例方面均有明显不同, 提示有可能是与蝙蝠回声定位行为和回声信息加工相关的特殊反应模式。

在蝙蝠行为学研究方面, 早期用粉虫 (Mealworm) 与塑料块混合后作为空抛物做目标识别, 以及用细钢丝列成的飞行屏障做空间分辨率行为学测试, 证实了它们有很高的目标识别能力和空间分辨率。通过录制蝙蝠追踪猎物过程中的发声信号, 发现在捕获相可高达 100 次/秒以上, 针对这种行为表现的电生理实验证据表明, 蝙蝠的听中枢神经元具有很高的时间分辨率, 以及从高脉冲重复率的回声中提取信息的能力。众所周知, 人声调的性别差异总体上是“女高男低”, 而近期在普氏蹄蝠上的研究发现, 其声调却是“男高女低”, 显示出雌雄二态性 (Sexual Dimorphism)。蝙蝠为了有效地发现目标和锁定目标, 它们能通过调节其口形 (Mouth Gape) 聚焦声呐场 (Sonar Field) 和调控发声信号的声束以锁定目标。可见, 在我们人类知道用雷达 (Radar) 聚焦和锁定目标之前, 蝙蝠使用这种技能已经先于我们千万年。对蝙蝠的巡航研究发现, 它们能根据回声携带的信息计算出外界物体在三维空间 (Three Dimensions, 3D) 中的位置; 近期还获得了它们的大脑能对头部方位进行 3D 编码的证据; 这种 3D 空间的辨别能力不仅有助于巡航, 亦能用于分类外界物体。由于蝙蝠在追踪猎物时, 会因飞行而使回声 CF 成分产生多普勒频率漂移, 这就需要蝙蝠根据频率漂移幅度和飞行速度计算出发声频率的补偿值, 确保回声主频总是落在耳蜗基底膜的“听觉中央凹”。人工回声测试表明, 蝙蝠能主动降低发声频率以补偿产生的多普勒漂移, 保持回声频率处于主频或主频附近。近期研究显示, 这种频率补偿行为受到听中枢的调控。“利己”和“共享”现象同样存在于蝙蝠中, 有研究观察到同种蝙蝠一同飞行时, 它们可交替发声并神奇地共享其回声。

这一发现说明大棕蝠可借助地球磁场来做远距离导航, 并在夜间飞行拥有超常的感觉能力。总之, 无论是对这种动物物种所表现出的神奇的回声定位行为, 还是它们与哺乳类乃至人类所共有的基本听觉机制, 均值得人们持续给予关注和研究。