

GNSS

与惯性及多传感器 组合导航系统原理

Paul D. Groves

李涛 练军想 曹聚亮 吴文启 等译

PRINCIPLES OF GNSS,
INERTIAL AND MULTISENSOR
INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS



国防工业出版社
National Defense Industry Press



本书得到 总装备部装备科技译著出版基金 资助出版
教育部新世纪优秀人材支持计划

GNSS 与惯性及多传感器 组合导航系统原理

Principles of GNSS, Inertial and Multisensor
Integrated Navigation Systems

Paul D. Groves

翻译 李 涛 练军想 曹聚亮
吴文启 唐康华 逯亮清
潘献飞
统校 李 涛

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军—2010—032

图书在版编目(CIP)数据

GNSS与惯性及多传感器组合导航系统原理 / 格鲁夫(Groves, P. D.)著;李涛等译. —北京:国防工业出版社,2011.11

书名原文: Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems

ISBN 978-7-118-07530-4

I. ①G… II. ①格… ②李… III. ①卫星导航—全球定位系统—惯性传感器—惯性导航系统 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 178518 号

Translation from the English Language Edition;

Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems by Paul D. Groves.

Copyright © 2008 Paul D. Groves.

All Rights Reserved.

Authorized Translation from English Language edition Published by Artech House.
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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$ 字数 546 千字

2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

译者序

时间与空间是世界的基本属性,因而对时间和空间关系的测量,就在现实世界中扮演着基础而且关键的作用。导航定位技术是获取运载体空间信息的技术,随着科学技术的发展,各种导航定位技术,如惯性导航、航位推算、陆基无线电导航、天文导航、卫星导航、匹配导航、组合导航等,已经日益深入地影响着人类社会的各个方面。

P. D. 格鲁夫的《GNSS 与惯性以及多传感器组合导航系统原理》一书,不仅全面系统地介绍了卫星导航、惯性导航、陆地无线电导航、航位推算、特征匹配以及组合导航的基本原理和研究现状,而且该书还具有以下两个鲜明的特点:

(1) 全书详细介绍了各种导航定位用传感器和设备。除了惯性传感器和卫星导航接收机以外,作者还讨论了大量其他导航定位技术中使用的传感器和设备,介绍了其工作原理,给出了其误差模型。如陆基无线电导航中,就包括罗兰及差分罗兰系统、仪表着陆系统、WLAN 室内定位、UWB 室内定位等。在航位推算系统中,则涵盖磁罗盘、气压和雷达高度计、里程计、多普勒雷达、声纳、测速仪等。书中还讨论了各种特征匹配导航系统。

(2) 将导航定位中的各种核心算法和模型作为重点,进行了系统论述。书中不仅对涉及的每种传感器和测量设备,给出了输出模型、误差模型、应用于组合导航时的系统模型及测量模型,还从组合导航应用的角度,详细地讨论各种典型组合导航系统的组合结构、组合模型以及组合导航的故障检测与完好性监测。

鉴于本书强调工程技术及核心算法的特点,为了学习和借鉴国外在导航技术领域的先进成果,国防科学技术大学机电工程与自动化学院导航技术教研室的几位老师,合作翻译了本书。具体分工如下:前言和第 1 章(吴文启),第 2 章、第 3 章(曹聚亮),第 4 章、第 5 章及附录(练军想),第 6 章、第 7 章(唐康华、郭瑶)、第 8 章、第 9 章(逯亮清)、第 10 章、第 11 章(潘献飞)、第 12 章~第 15 章

及符号表(李涛)。何晓峰对有关组合导航的部分章节、穆华对有关匹配导航的部分章节、刘颖对第3章、吕云霄对第2章、孔祥龙对第10章、第11章分别进行了校译。吴文启及李涛还对全部译稿进行了认真的校译和评阅,全书由李涛统稿。

感谢教育部新世纪优秀人才计划 NCET-07-0225 对本书翻译出版的资助。

我们衷心希望本书的翻译和出版,对我国从事导航技术的同仁们有所帮助。由于时间和水平有限,翻译难免存在许多不足之处,敬请读者批评指正。

译 者

2011年6月

关于作者

保罗 D. 格鲁夫(Paul D. Groves) 拥有牛津大学物理学学士学位(享有一级荣誉生称号)、原子与激光实验物理学硕士(牛津郡)和博士学位。自从 1997 年 1 月加入防御评估与研究署后,他一直积极致力于导航系统的研究。2001 年 7 月,他转到 QinetiQ 公司,并在本书写作期间,成为自主制导与远程信息处理团队下属导航与定位算法研究组的主要科学家。

P. D. 格鲁夫博士 主要从事各种导航系统的组合与数学建模研究,其研究工作涉及飞机、制导武器、步行导航以及自主潜航器导航。他开发了很多用于 INS/GNSS 的紧耦合和深组合导航、多传感器组合导航、传递对准、准静基座对准、零速修正、步行航位推算、GNSS 的 C/N_0 测量以及惯性导航算法。他还开发了一个高逼真的 GPS 仿真软件,并对地形参考导航和视觉导航算法设计做出一定贡献。他发表了多篇会议和期刊论文,并开设了一门为期两天的“组合导航原理”课程。他还拥有与自适应紧耦合组合导航有关的专利一项。

格鲁夫博士 皇家导航协会会员,在该协会的技术与研发委员会中任职。他同时还是导航协会现任会员和物理协会特许会员。他协助组织了多次学术会议与讲座,并担任多种刊物的同行审查人。

原书前言

本书的主要目的包括四个方面:

- (1) 介绍导航系统概论,适合对该领域知识没有预先了解的读者。
- (2) 定性定量说明卫星导航、惯性导航及许多其他导航技术的工作原理。
- (3) 回顾导航技术的最新发展。
- (4) 详细阐述组合导航技术。

本书面向工业界、学术界及政府部门的专业科技人员、工程师以及大学本科高年级学生、硕士研究生、博士研究生或相应水平的读者。

本书首先初步介绍导航的基本原理,简要说明各种不同的导航技术,然后仔细讲解不同坐标系、姿态表示方法、多坐标系运动学、地球几何模型与重力场。书中每一专题在深入详细的内容之前都有初步原理的讲解。

为了涵盖导航技术的最新发展,本书不仅涉及各种全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)和惯性导航,而且增加了陆地无线电导航、航位推算和特征匹配导航技术,其专题内容包括罗兰(Loran)、无线区域网络(Wireless Local Area Network, WLAN)和超宽带(Ultra Wide Band, UWB)定位、磁强计、姿态航向参考系统(Attitude and Heading Reference Systems, AHRS)、高度计、里程计、步行航位推算、多普勒雷达、声纳、地形参考导航、图像匹配和地图匹配。

全球导航卫星系统部分的各章内容有:历史沿革、新的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)及伽利略(Galileo)卫星导航系统、导航信号;同时,覆盖了一系列高级专题,包括差分及载波相位定位、GNSS测姿、多路径效应补偿、低信噪比环境下工作等。惯性导航领域包括加速度计和陀螺技术、导航方程、初始化、对准、零速修正。

组合导航部分的各章内容有:用一章篇幅介绍卡尔曼滤波,以导航应用为主;随后几章包括惯性(Inertial Navigation System, INS)/GNSS组合导航及深组合,以及多传感器组合导航。为支撑这些章节内容,在导航传感器章节中包括了对处理过程和误差源的全面分析。本书最后一章为完好性监测,说明导航系

统如何检测故障及从故障中恢复。

本书着重使读者理解导航系统是如何工作的,而不是拘泥于工程的细节,着重于作为各种导航系统基础的物理原理,如何根据这些原理产生导航结果,这些原理怎样结合共同支撑组合导航,误差源的产生机理及误差补偿。后续章节以前面章节材料为基础,各部分内容相互参照。

本书分为四大部分。第一部分是定性介绍,第二部分阐述导航及组合导航系统的数学基础,第三部分讲述导航系统,首先是惯性导航,然后是卫星导航,最后其他导航技术。第四部分讲述组合导航,包括故障检测与完好性监测。附录中包括向量、矩阵、统计学知识以及全书的符号与缩略语列表。

和许多领域一样,一直以来导航界并没有沿用一致的符号与术语。在此,全书采用了统一的符号,对于常用的替代符号则在适当的地方注明。书中采用最通用的惯例,但为了避免引起歧义、且使表述更加明确,也有一些例外。

标量用大写或小写的斜体表示。矢量用小写粗体表示,矩阵用大写粗体表示,采用相应的标量表示矢量分量或矩阵的元素。矢量积(或叉乘)用符号 \wedge 表示(许多文献采用符号 \times 表示叉乘,译者注),而狄拉克标记(如 \dot{x} 、 \ddot{x} 等)通常用于表示对时间的导数。出现的所有方程都假设采用标准国际单位制,米、秒和弧度。正文中采用的其他一些单位有度($1^\circ = \pi/180\text{rad}$)、小时($1\text{h} = 3600\text{s}$)以及用于表示重力加速度的 g ($1g \approx 9.8\text{m/s}^2$)。

除非另外声明,所有引用的不确定度及误差范围均为 1σ 总体标准差,若采用高斯(正态)分布,则对应68%的置信度水平,沿用该惯例是因为积分及其他估计算法采用 1σ 误差界限模型。

用方括号表示文献引用,文献按序号在每章后面列出。许多章还包括一个选出的参考书目,列出更多的有关出版文献。

我对下列人员的帮助深表谢意,感谢他们的意见和建议: Neil Boasman, Paul Cross, Steve Davison, Peter Duffett-Smith, Simon Gouldsworthy, Robin Handley, David Last, Nigel Mills, Washington Ochieng, Charles Offer, Tony Pratt, Graham Pulford, Andrew Runnalls, Andrey Soloviev, Roger Stokes, Jan Wendel, 以及 Artech House 出版社的匿名评论家。感谢 QinetiQ 公司允许我再次使用为《组合导航原理》课程撰写的教材内容。这些内容主要出现在第2章、第3章、第5章和第12章,以尾注标明了 QinetiQ 公司的版权。最后,感谢我的家人、朋友和同事,感谢他们的耐心和支持。

更新和修订列表,以及印刷符号和缩写列表可网上在线得到。网页链接:
<http://www.artechhouse.com>。

目 录

第 1 部分 绪论	
第 1 章 绪论	1
1.1 什么是导航	1
1.1.1 定位	2
1.1.2 航位推算	3
1.2 惯性导航	5
1.3 无线电和卫星导航	6
1.3.1 地面无线电导航	7
1.3.2 卫星导航	8
1.4 特征匹配	9
1.5 完整的导航系统	10
参考文献	11
第 2 部分 导航数学基础	
第 2 章 坐标系、运动学和地球	12
2.1 坐标系	12
2.1.1 地心惯性坐标系	13
2.1.2 地心地固坐标系	14
2.1.3 当地导航坐标系	15
2.1.4 载体坐标系	16
2.1.5 其他坐标系	16
2.2 运动学	17
2.2.1 欧拉角姿态表示	18
2.2.2 坐标转换矩阵	20
2.2.3 四元数姿态表示	22
2.2.4 旋转矢量	23
2.2.5 角速度	23
2.2.6 笛卡儿位置	24
2.2.7 速度	25
2.2.8 加速度	26
2.3 地球表面形状和重力模型	27
2.3.1 地球表面的椭球模型	27
2.3.2 曲线坐标系位置表示	30
2.3.3 大地水准面和垂线高度	33
2.3.4 地球自转	34
2.3.5 比力、地心引力和重力	35
2.4 坐标系变换	38
2.4.1 惯性系和地球系间 转换	39
2.4.2 地球系和当地导航 坐标系间转换	40
2.4.3 惯性系和当地导航 坐标系间转换	40
2.4.4 导航结果的转换	41
参考文献	42
参考书目	43
尾注	43
第 3 章 卡尔曼滤波	44
3.1 绪论	44
3.1.1 卡尔曼滤波的要素 和流程	45
3.1.2 卡尔曼滤波的应用	47
3.2 卡尔曼滤波算法和模型	47
3.2.1 定义	48

3.2.2	卡尔曼滤波算法	50
3.2.3	滤波特性	53
3.2.4	系统模型	54
3.2.5	观测模型	57
3.2.6	闭环卡尔曼滤波器	59
3.3	卡尔曼滤波实现中的问题	60
3.3.1	算法调整和算法稳定性	60
3.3.2	算法设计	62
3.3.3	数值计算问题	63
3.3.4	滞后数据处理	64
3.3.5	卡尔曼滤波设计过程	66
3.4	卡尔曼滤波的扩展	66
3.4.1	扩展和线性化卡尔曼滤波	66
3.4.2	时间相关噪声和施密特卡尔曼滤波	68
3.4.3	自适应卡尔曼滤波	70
3.4.4	多假设滤波	71
3.4.5	卡尔曼平滑	74
	参考文献	75
	参考书目	77
	尾注	77

第3部分 导航系统

第4章	惯性传感器	78
4.1	加速度计	80
4.1.1	摆式加速度计	81
4.1.2	振梁式加速度计	83
4.2	陀螺仪	83
4.2.1	转子陀螺	84
4.2.2	光学陀螺	86
4.2.3	振动陀螺	89

4.3	惯性测量单元	91
4.4	误差特性	93
4.4.1	零偏	94
4.4.2	标度因数和交叉耦合误差	95
4.4.3	随机噪声	96
4.4.4	深层次误差源	97
4.4.5	误差模型	98
	参考文献	99

第5章 惯性导航

5.1	惯性系导航方程	101
5.1.1	姿态更新	102
5.1.2	比力坐标转换	103
5.1.3	速度更新	104
5.1.4	位置更新	104
5.2	地球系导航方程	105
5.2.1	姿态更新	105
5.2.2	比力坐标转换	106
5.2.3	速度更新	106
5.2.4	位置更新	107
5.3	当地导航系导航方程	107
5.3.1	姿态更新	108
5.3.2	比力坐标转换	109
5.3.3	速度更新	110
5.3.4	位置更新	111
5.3.5	游动方位导航实现	111
5.4	导航方程的精确计算	112
5.4.1	迭代频率	113
5.4.2	姿态更新	114
5.4.3	比力坐标转换	118
5.4.4	速度和位置更新	119
5.4.5	振动的影响	120
5.5	初始化和对准	122

5.5.1 位置和速度初始化	122	6.5.1 “北斗 I”和“北斗 II” 卫星导航系统	162
5.5.2 姿态初始化	123	6.5.2 QZSS	163
5.5.3 精对准	126	6.5.3 IRNSS	164
5.6 惯性导航系统误差传播	127	6.6 GNSS 的互操作性	164
5.6.1 短时间直线运动 误差传播	128	6.6.1 频率的兼容性	165
5.6.2 中、长时间导航 误差传播	130	6.6.2 用户设备的竞争	165
5.6.3 绕圈航行导致的误差	132	6.6.3 多系统兼容型的 用户设备	166
5.7 平台式惯性导航系统	133	参考文献	167
5.8 平面惯性导航系统	134	参考书目	169
参考文献	134		
参考书目	135		
尾注	135		
第 6 章 卫星导航系统	136	第 7 章 卫星导航信号处理、误差 及空间几何分布	170
6.1 卫星导航的基础	136	7.1 卫星导航几何分布	171
6.1.1 GNSS 的构成	137	7.1.1 卫星位置和速度	171
6.1.2 定位	138	7.1.2 距离、距离率及 视线矢量	177
6.1.3 信号和测距	141	7.1.3 仰角和方位角	180
6.2 GPS	145	7.1.4 信号几何分布及导航 解算精度	181
6.2.1 空间和控制段	146	7.2 接收机硬件及天线	184
6.2.2 信号	148	7.2.1 天线	185
6.2.3 导航电文	151	7.2.2 参考晶振及接收机 时钟	185
6.2.4 增强系统	152	7.2.3 接收机的前端	186
6.3 GLONASS	154	7.2.4 基带信号处理	189
6.3.1 空间和控制段	154	7.3 测距处理器	198
6.3.2 信号	155	7.3.1 捕获	198
6.3.3 导航电文	156	7.3.2 码跟踪	201
6.4 Galileo	157	7.3.3 载波跟踪	205
6.4.1 空间和地面段	158	7.3.4 跟踪锁定检测	211
6.4.2 信号	159	7.3.5 导航电文解调	212
6.4.3 导航电文	161	7.3.6 载波功率噪声密度	
6.5 区域导航系统	162		

比测量值	213	8.3.3 辅助的 GNSS	256
7.3.7 伪距、伪距率及载波		8.3.4 捕获	256
相位测量值	214	8.3.5 跟踪	257
7.4 测距误差源	215	8.3.6 扩展相干积分	258
7.4.1 卫星时钟和星历预测		8.4 多路径抑制	259
误差	216	8.4.1 天线系统	259
7.4.2 电离层和对流层传播		8.4.2 接收机技术	259
误差	217	8.4.3 多路径映射图	260
7.4.3 跟踪误差	219	8.4.4 导航处理器滤波	260
7.4.4 多路径效应	222	8.5 信号监测	261
7.5 导航处理器	225	8.6 半无码跟踪	262
7.5.1 单点导航解算	227	参考文献	262
7.5.2 滤波导航解算	229		
7.5.3 导航和跟踪的合并	236	第 9 章 陆基无线电导航	266
7.5.4 定位误差预算	239	9.1 点源系统	266
参考文献	241	9.2 罗兰	268
参考书目	243	9.2.1 罗兰系统	269
尾注	244	9.2.2 信号与用户终端	
第 8 章 卫星导航高级应用	245	处理	270
8.1 差分 GNSS	245	9.2.3 定位	271
8.1.1 GNSS 误差的空间与		9.2.4 误差源	272
时间相关	246	9.2.5 差分罗兰	273
8.1.2 局域和区域		9.3 仪表着陆系统	274
DGNSS	246	9.4 城市与室内定位	275
8.1.3 广域 DGNSS	247	9.4.1 移动电话	275
8.1.4 精密单点定位	248	9.4.2 泛无线信号	276
8.1.5 相对 GNSS	248	9.4.3 GNSS 转发器	276
8.2 载波相位定位与定姿	249	9.4.4 WLAN 定位	276
8.2.1 整周模糊度解算	251	9.4.5 UWB 定位	277
8.2.2 GNSS 姿态确定	253	9.4.6 短距离信标	278
8.3 低信噪比环境	254	9.5 相对导航	278
8.3.1 天线系统	254	9.6 跟踪	280
8.3.2 接收机前端滤波	255	9.7 声纳收发器	280
		参考文献	281

第 10 章 航位推算,姿态和高度

测量	283
10.1 姿态测量	283
10.1.1 调平	283
10.1.2 地磁定向	284
10.1.3 组合航向测量	287
10.1.4 姿态航向参考系统	288
10.2 高度和深度测量	288
10.2.1 气压高度计	288
10.2.2 深度压力传感器	290
10.2.3 雷达高度计	290
10.3 里程计	291
10.4 步行航位推算	295
10.5 多普勒雷达和声纳	297
10.6 其他航位推算技术	299
10.6.1 图像处理	299
10.6.2 地标跟踪	300
10.6.3 相关测速仪	300
10.6.4 大气数据	300
10.6.5 船速仪	301
参考文献	301

第 11 章 特征匹配

11.1 地形参考导航	304
11.1.1 序贯处理	305
11.1.2 批处理	306
11.1.3 性能	308
11.1.4 激光 TRN	309
11.1.5 气压 TRN	309
11.1.6 声纳 TRN	310
11.2 图像匹配	310
11.2.1 区域相关景象匹配	311
11.2.2 连续视觉导航	311

11.3 地图匹配	312
11.4 其他特征匹配技术	314
11.4.1 恒星导航	314
11.4.2 重力梯度测量	315
11.4.3 地磁场异常	315
参考文献	316
参考书目	318

第 4 部分 组合导航

第 12 章 INS/GNSS 组合

导航	319
12.1 组合结构	320
12.1.1 惯性导航参数校正	321
12.1.2 松耦合组合导航	324
12.1.3 紧耦合	325
12.1.4 GNSS 辅助	326
12.1.5 深组合	328
12.2 系统模型与状态选择	330
12.2.1 状态选择与可观性	330
12.2.2 惯性系中的 INS 误差 状态传播	332
12.2.3 地球系中的 INS 误差 状态传播	336
12.2.4 当地导航坐标系下的 INS 误差状态传播	337
12.2.5 INS 系统噪声	341
12.2.6 GNSS 状态传播与 系统噪声	342
12.3 测量模型	342
12.3.1 松耦合组合导航	343
12.3.2 紧耦合组合导航	346
12.3.3 深组合	348
12.3.4 姿态与仪表误差 的估计	351

12.4 关于 INS/GNSS 组合的 进一步讨论	351	14.2.2 紧耦合组合导航	384
12.4.1 差分 GNSS	351	14.3 航迹推算、姿态和高度 测量	386
12.4.2 载波相位定位与 GNSS 姿态	352	14.3.1 姿态	387
12.4.3 大航向角误差	353	14.3.2 高度和深度	389
12.4.4 IMU 高级误差建模	354	14.3.3 里程计	390
12.4.5 平滑	354	14.3.4 步行航位推算	392
参考文献	355	14.3.5 多普勒雷达和声纳	393
参考书目	357	14.4 特征匹配	394
尾注	358	14.4.1 定位	394
		14.4.2 轨迹确定	395
		14.4.3 多义测量	396
		参考文献	397
第 13 章 INS 对准与零速修正	359		
13.1 传递对准	359	第 15 章 故障检测与完好性 监测	398
13.1.1 传统测量匹配	360	15.1 故障模式	398
13.1.2 快速传递对准	362	15.1.1 惯性导航	398
13.1.3 参考导航系统	363	15.1.2 GNSS	399
13.2 未知航向时的准 静态对准	364	15.1.3 陆基无线电导航	399
13.3 伪静基座精对准与 零速修正	366	15.1.4 航迹推算、姿态和 高度测量	400
参考文献	368	15.1.5 特征匹配	400
参考书目	369	15.1.6 组合算法	400
		15.2 范围检查	401
第 14 章 多传感器组合导航	370	15.2.1 传感器输出	401
14.1 组合结构	371	15.2.2 导航参数	401
14.1.1 最小二乘组合	371	15.2.3 卡尔曼滤波器估计	401
14.1.2 级联式组合	373	15.3 卡尔曼滤波器测量新息	402
14.1.3 集中式组合	375	15.3.1 新息滤波	403
14.1.4 联邦式结构	376	15.3.2 新息序列监测	404
14.1.5 混合组合结构	379	15.3.3 对有偏状态估计 的补救	405
14.1.6 用于预测的全状态 卡尔曼滤波器	380	15.4 直接一致性检查	406
14.1.7 误差状态卡尔曼滤波	382	15.4.1 测量一致性检查 与 RAIM	407
14.2 陆基无线电导航	383	15.4.2 并行结果	408
14.2.1 松耦合组合导航	383		

15.5 完好性监测的检定·····	412	B.2 概率密度函数·····	425
参考文献·····	415	B.3 高斯分布·····	426
附录 A 向量和矩阵 ·····	417	B.4 χ^2 分布·····	427
A.1 向量介绍·····	417	参考文献·····	428
A.2 矩阵介绍·····	419	符号表 ·····	429
A.3 特殊矩阵类型·····	421	矩阵·····	429
A.4 逆矩阵·····	422	向量·····	429
A.5 向量和矩阵的微分·····	423	标量·····	430
参考文献·····	424	上、下标·····	433
附录 B 统计方法 ·····	425	限定词·····	436
B.1 均值、方差和标准偏差·····	425	缩略语表 ·····	437

第 1 部分 绪 论

第 1 章 绪 论

什么是“导航”? 全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS),如全球定位系统(Global Positioning System, GPS),是如何工作的? 什么是惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)? 绪论阐述导航技术的基本概念,对本书内容进行全面的定性概括,介绍和比较主要的导航技术,展示当前导航技术的发展历程。

1.1 节定义导航的概念,阐述两大类基本的导航技术:定位与航位推算,这是绝大多数导航系统的基础。1.2 节初步介绍惯性导航系统,讨论其优缺点。1.3 节介绍无线电导航,包括地面无线电导航和卫星导航。1.4 节讨论特征匹配技术,如地形参考导航(Terrain Referenced Navigation, TRN)。最后,1.5 节讨论不同的导航技术如何结合成为完整的组合导航系统。

1.1 什么是导航

并没有关于导航(navigation)的普遍认同的严格定义。简明牛津辞典(Concise Oxford Dictionary)^[1]将导航定义为:“通过几何学、天文学、无线电信号等任何手段确定或规划船舶、飞机的位置及航线的方法。”这里包含了两个概念,首先是确定运动物体相对已知参考系的位置和速度,有时也称为导航科学;其次是由一个地方到另一个地方航线的规划与保持,回避障碍并避免碰撞,有时也称为导航方法,针对不同的运动载体也可称为制导、领航或航线规划。本书只关注前一概念,即导航科学。

导航技术(navigation technique)是确定位置和速度的方法,可以是人参与的也可以是自动实现的。导航系统(navigation system),有时也称作辅助导航设备,是自动确定位置和速度的装置。一些导航系统也提供部分或全部的姿态(包括航向)、加速度和角速度。导航系统可以是自主的,安装在导航载体上(例如惯性导航

系统);也可以除用户部分外还需要其他外部设施,例如无线电导航系统。导航系统或导航技术的输出称为导航结果(navigation solution)。导航传感器(navigation sensor)是用来测量与导航有关的物理特性的设备,根据测量的物理特性可以计算出导航结果,如加速度计、陀螺和无线电导航接收机等。

导航结果表示了导航载体(如飞机、船舶、车辆或人员)坐标系和参考坐标系的相对关系,地球是常用参考系。包含导航结果的向量各分量也可以投影到其他坐标系的各个坐标轴上(如北向、东向和朝下方向)。导航常用坐标系在 2.1 节中描述。导航系统通常采用旋转的参考坐标系来匹配地球的自转,这需要仔细定义速度和加速度,这些在 2.2 节中具体说明。2.2 节中还描述姿态的多种不同表示方法,如欧拉角、坐标转换矩阵、四元数或旋转矢量。2.3 节中介绍如何基于导航目的对地球表面进行建模,并定义了经度、纬度和高程。

定位(positioning)是确定载体的空间位置,而不包括速度和姿态。许多导航技术,严格地讲虽然是定位系统,但工作时更新率足够高,可以根据位置变化率推导出速度。

与导航系统不同,跟踪(tracking)和监视(surveillance)系统的位置和速度信息由第三方获得,不需要在被跟踪的目标上安装设备。不过,跟踪系统也可以用于导航,只需将测量到的位置速度信息发送给被跟踪目标即可。类似地,导航系统也可以用于跟踪,只需将导航结果发送给跟踪站。

大多数导航技术基于两类基本的导航方法:定位和航位推算,以下进行具体说明。

1.1.1 定位

有多种定位方法。特征匹配,是将当前位置的特征,如地标、航路点或地形高度,与地图进行比较,确定当前位置。采用该方法,人往往比机器更容易实现特征信息的匹配。也可以通过测量到已知点的距离、方向实现定位。对于二维情况下的定位可以通过图 1.1 进行说明,图中 X 代表未知的用户位置,A 和 B 代表位置已知的两个参考点。

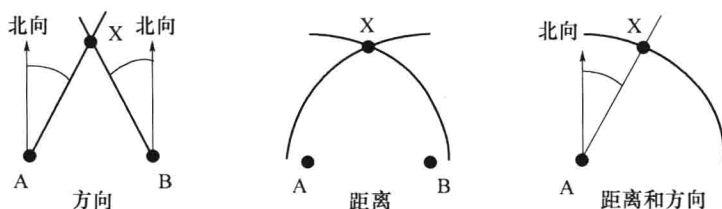


图 1.1 测量方向和距离的定位方法