

导航定位技术及应用

Navigation localization technology and its application

张爱军 赵辉 谢小敏 编著

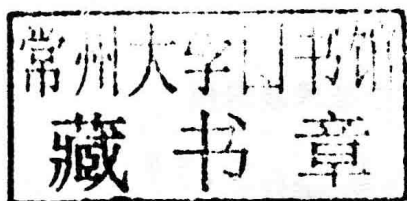


电子科技大学出版社

导航定位技术及应用

Navigation localization technology and its application

张爱军 赵辉 谢小敏 编著



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

导航定位技术及应用 / 张爱军, 赵辉, 谢小敏 编著. — 成都 : 电子科技大学出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-5647-2367-5

I. ①导… II. ①张… ②赵… ③谢… III. ①卫星导航—全球定位系统 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第092955号

导航定位技术及应用

张爱军 赵 辉 谢小敏 编著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都一环路东一段159号电子信息产业大厦
邮编: 610051)

策划编辑: 谭炜麟

责任编辑: 谭炜麟

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 北京旺鹏印刷有限公司

成品尺寸: 145mm×210mm 印张 12 字数280千字

版 次: 2016年3月第2版

印 次: 2016年3月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-2367-5

定 价: 59.80元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

序

导航是为运动载体准确到达目的地的导引工作提供的实时的位置、速度和姿态等信息的一门技术。高精度、高可靠性、强自主性的导航系统，能够为各种运动体及运载体提供高精度运动参数信息，是实现其准确航行的前提。随着光学技术、航天技术、通信技术、计算机技术、信息融合技术等迅猛发展，导航系统的发展也日新月异。且由于可用于导航信息源越来越多，相应的导航系统的种类也在不断的增加，除了惯性导航系统、卫星导航系统、水声导航、天文导航外，地磁导航系统、地形辅助导航技术、脉冲星导航以及组合导航系统等也在快速发展。作为国家重要的信息基础和战略设施，导航定位技术已然成为国家综合实力以及科学技术发展水平的重要标志之一。

本书是系统介绍导航定位技术的一部综合性理论教科书，内容丰富，可作为航空航天、海洋、交通运输、武器、探测制导等专业初学者的教学用书，也可作为相关专业研究生及技术人员的参考用书。相信本书的出版将有力的促进我国导航技术的发展，



在科学研究和工程应用中起到很好的借鉴和促进作用，为导航定位技术领域培养人才做出重要的贡献。

王昌明

卜雄洙

张自嘉

王昌明：毕业于南京理工大学自动机械专业，教授，博士生导师。某型号项目的总设计师。自参加高校工作以来先后主持多项省、部级科研项目的工作，曾获国家科技进步二、三等奖各一项，机电部科技进步一等奖一项，部级科技进步二等奖二项，国防科工委科技进步三等奖三项，江苏省重大科技进步四等奖二项，光华基金二等奖一项，霍英东基金二等奖一项（研究类），获发明专利十余项，发表论文百十余篇，专著五本，1992年获政府特殊津贴。

卜雄洙：男，1966年3月出生，南京理工大学机械工程学院教授、博士生导师。毕业于南京理工大学测试计量技术及仪器专业，获得博士学位。主要研究方向是惯性测量技术、动态测试与虚拟仪器技术、智能测控技术与系统。发表论文90余篇，专著二本，获国防发明专利十项，部级奖三项。

张自嘉：男，1964年11月出生，南京信息工程大学教授，硕士生导师。目前主要从事仪器科学与技术方面的教学与科研工作，主要研究方向是现代传感、检测技术，水下导航定位与信息交换技术、新型气象观测方法与仪器等。

前 言

导航 (Navigation), 源于海洋船舶航行, 导航的初始形式是罗盘领航和天文导航, 此后发展到陆地车辆和航空飞行器的行驶, 是人类的基本活动, 其技术的发展决定了人类精确控制自身活动范围的能力。

导航的种类系统繁多, 常见的有惯性导航、卫星导航、声学导航以及地形辅助导航、地磁导航、脉冲星导航等。本书于每一章节分别介绍了各类导航系统, 主要内容包括基本工作原理系统组成及工作方式。此外, 关于导航定位的基础知识如地球的数学模型, 常用坐标系和时间基准等将在第二章给出。

惯性导航是现代导航技术中比较先进的一种, 其主要特点是不依赖任何外界信息能够自主地导航, 通过测量航行体运动的加速度求得其速度和位置的导航系统; 卫星导航系统是重要的空间信息基础设施, 根据卫星发送的导航定位信号, 并以导航卫星作为动态已知点, 实时地测定运动载体的在航位置和速度, 进而完成导航, 其目前已基本取代了地基无线电导航、传统大地测量和天文测量导航定位技术, 并推动了大地测量与导航定位领域的全新发展; 海水具有良好的导电性, 电磁波在海水中传播衰减迅速, 从而也限制了基于无线电的导航系统等常规导航技术在水下定位和导航中的应用。相对于无线电信号, 由于声学信号在海水中传



播衰减很小，可以穿透较远的距离，水下声学定位和导航系统得到了快速发展和广泛应用；组合导航技术是指利用两个或两个以上导航系统所提供的导航信息，通过融合处理获取最佳导航信息的导航技术。计算机技术的发展、现代控制理论、数据处理技术、最优估计等为组合导航技术提供了有力的信息处理工具；全球定位系统、天文导航系统、惯性导航系统等导航技术则为组合导航技术提供了多样的组合方式；此外，一些新型导航如地形辅助导航、地磁导航、脉冲星导航以及天文导航系统等也得到了广泛的应用。

全书共分为七章，南京政治学院的赵辉、南京理工大学的张爱军负责全书的整体结构规划，大部分章节的撰写以及全书的校订。南京理工大学：徐威利、王彦坤等负责第二章的整理及撰写，孟红波整理撰写第三章，第四章由吕乐完成，胡伟伟撰写第五章，第六章由谢小敏、胡华恩合作撰写，第七章由谢小敏、陆慧慧归纳及撰写。另外，在本书的编写过程中宋高顺博士、陆建山博士、孟翔飞博士，奚芳华，蒋帆，袁耀东，彭杨杨，杨凡宇，韩萌等协助完成了素材准备、文字校对、统稿等工作，此外，本书参阅了互联网上相关文章和有关资料，在此一并对文章的作者表示衷心的感谢！

由于作者的时间、水平和能力有限，书中难免存在错漏和不足，敬请读者不吝斧正！

编 者

2014年3月

目 录/CONTENTS

序	1
前 言	3
第一章 绪 论	1
1.1 导航技术的发展及现状	1
1.2 导航技术的分类	3
1.3 导航技术的现状及趋势	4
第二章 导航定位基础知识	11
2.1 地球模型	11
2.2 常用坐标系及相互转换	17
2.3 时间基准	26
第三章 惯性导航	34
3.1 惯性器件	34
3.2 惯性导航系统的基本原理	52
3.3 惯性导航分类	65
3.4 惯性导航系统初始对准技术	71
第四章 卫星导航	82
4.1 卫星定位基本原理	84



4.2	卫星导航概念及定位测速原理	88
4.3	卫星导航分类	102
第五章	水声导航定位	169
5.1	概述	169
5.2	系统组成及导航方式	172
5.3	水声导航定位系统及其工作原理	174
5.4	系统数据处理	182
5.5	定位误差分析	191
5.6	多普勒测速原理	197
5.7	影响多普勒测速的主要因素及改进方法	200
5.8	多普勒计程仪在大深度使用时摇摆问题的分析 及摇摆补偿	208
5.9	多普勒测速声呐的频率测量	214
5.10	声相关测速技术	222
第六章	组合导航	228
6.1	组合导航系统概述	229
6.2	组合导航系统中的数据融合	235
6.3	组合导航常用组合模式	270
第七章	其他导航方式	287
7.1	天文导航	287
7.2	地形辅助导航	301
7.3	地磁辅助导航	325
7.4	脉冲星导航	340
	参考文献	353

第一章 绪 论

1.1 导航技术的发展及现状

导航即导引航行,引导物体沿一定航线从一点运动到另一点的科学或技术。导航首先要定位,确定航行体的位置,然后根据航行体的位置确定目标和运动方向。为了适应生产生活的需求,人类在发展过程中发明了许多定位方法。最初人们根据他人留下的标记,例如特殊形状的树枝石头,树上墙面留下的符号等判断追踪标记他人的行踪或位置。

指南车是我国古代一种指示方向的车辆,也作为帝王的仪仗车辆。指南车车箱内部设置有一套可自动离合的齿轮传动机构。当车子行进中偏离正南方向,向东(左)转弯时,东辕前端向左移动,而后端向右(向西)移动,即将右侧传动齿轮放落,使车轮的转动能带动木人下方的大齿轮向右转动,恰好抵消车辆向左转弯的影响,使木人手臂仍指南方。当车子向西(右)转弯时,则左侧的传动齿轮放落,使大齿轮向左转动,以抵消车子右转的影响。而车子向正前方行进时,车轮与齿轮系是分离的,因此木人手臂所指的方向不受车轮转动的影响。如此,不管车子的运动方向是东西南北,或不断变化,车上木人的手臂总是指向南方,起着指引方向的作用。

英国人吉尔伯特用观察、实验方法科学地研究了磁与电的现象,并把多年的研究成果,写成名著《论磁》,于1600年在伦敦出版。《论磁》中记录了磁石的吸引与排斥;磁针指向南北等性质;研究了磁针与球形磁体间的相互作用,发现磁针在球形磁体上的指向和磁针在地面上不同位置的指向相仿,还发现了球形



磁体的极，并断定地球本身是一个大磁体，提出了“磁轴”“磁子午线”等概念。

时代进步，科技发展，中国四大发明之一指南针的出现，是导航定位技术史上的一个里程碑，利用指南针能大致判断自身所处的方位，不至于在茫茫大海或荒凉沙漠丢失方向。

后来，人们根据指南针原理研制出了磁罗盘（磁罗经）用以指示方位，测量航向倾角。磁罗盘是利用地磁场固有的指向性测量载体的三维姿态数据（水平航向角、俯仰角、横滚角）。由于地球磁场南北极与地理南北极不重合引起磁差现象存在，需用各地磁差矫正数据再加上磁针所指角度的磁航向读数，得到真实航向。磁罗盘的存在是世界导航定位史上的又一次进步，但由于地球磁场分布不均匀，例如南北两极根本无法使用磁罗盘，磁罗盘的偏差也难以矫正，因而出现较大误差。

人类一直以来都善于利用天文推测未来的天气，同样，也善于利用星星的位置来推算自身的位置，北斗七星就是人们推崇的绝好定位标准。这种方法简单易行，属于天文导航范畴，但由于天气阴晴云雨不定，天文导航大受限制。

在航海中，人们曾利用海岸电台产生的电波信号导航，但是无线电波的损耗较严重，在碰到折射反射时，对结果的干扰还是比较明显的。

1957年10月4日，前苏联发射了人造卫星以后，前苏联和美国的科学家均产生了把无线电导航信源从地面导航塔搬到卫星上的想法，以解决无线电导航塔高度受限，造成导航覆盖范围较小的问题。由于卫星覆盖范围大，所以维持一定的卫星数量，并采用广播式通信方式，把测距码和导航电文广播至全球，便可以实现覆盖全球的导航定位；还可以把二维平面定位推进到三维定位，使卫星导航的功能与精度发生了变革，开创了导航技术和能力的新纪元。

卫星导航的出现很好地解决了范围小、精度低、误差累加的问题，1958年，美国开始研究子午仪系统（Transit），到了1964年

该系统建成并开始使用。但是该系统的组成卫星只有 5~6 颗,平均处在 1,000km 的高度,从地面站观测到卫星平均需要 1.5h,间隔较长,所以无法连续地提供实时的三维导航,精度也比较低。

目前世界上应用最广的卫星导航系统主要是:美国的全球定位系统 (GPS)、前苏联 / 俄罗斯的全球导航卫星系统 (GLONASS)、欧洲航天局的伽利略 (Galileo) 卫星定位系统以及我国的北斗卫星导航定位系统。

1.2 导航技术的分类

导航的分类就狭义来讲,按导航所需信息来区分,可大致分为:惯性导航,无线电导航,天文导航,声纳导航,地磁辅助导航,地形辅助导航,脉冲星导航。

(1) 惯性导航:依据牛顿惯性原理,利用惯性元件(加速度计或者陀螺)来测量运载体在惯性坐标系下的加速度等导航信息,经过积分和运算得到速度和位置,从而达到对运载体导航定位的目的。

(2) 天文导航:利用星体敏感器对自然天体测量获得的信息来确定自身位置和航向的导航方式。

(3) 无线电导航:利用无线电电磁波传播特性测量出载体导航参量信息(方位、距离和速度)进行导航。

(4) 声纳导航:利用测量到的机械波信息进行导航。

(5) 地磁辅助导航:利用地磁在不同地点有不同规则变化的特征产生定位信息。

(6) 地形辅助导航:利用无线电高度表和数字地图来辅助惯性导航。

(7) 脉冲星导航:利用脉冲星信号测定卫星姿态。

按照导航载体所处位置的不同,导航还可以分为以下几类:

(1) 陆上导航。

(2) 海上导航。



(3) 水下导航。

(4) 星际导航。

若按照导航载体的功能与类型不同, 导航可分为:

(1) 飞行器导航。

(2) 车载导航。

(3) 舰载导航。

(4) 火箭导航。

(5) 智能机器导航。

(6) 医学微创手术导航等。

按照导航载体所在运动轨迹的空间, 导航可分为:

(1) 一维导航: 高铁, 有轨电车等已事先预定好运动轨迹的导航载体。

(2) 二维导航(平面导航): 汽车。

(3) 三维导航: 导弹, 火箭, 飞机等。

目前, 按照国际上一般采用的分类方法进行归纳, 按照惯性导航精度的高低和惯性导航系统的成本高低将导航大致划分为如下几类。

(1) 低成本惯导系统: 主要以体积较小的 MEMS 器件为主, 成本控制在 15 美元左右。

(2) 武器战术级惯导系统: 主要指用于各类需制导的武器系统上, 工作周期在十分钟之内, 成本一般为 5 万人民币到 20 万人民币不等。

(3) 航空级惯导系统: 是指用于多种民用或者军用飞机上的惯导系统, 成本一般在 100 万人民币左右。

(4) 航海级惯导系统: 一般应用于潜艇或者高吨位大型航海舰艇上, 成本有百万有千万, 价格差异较大。

1.3 导航技术的现状及趋势

随着导航技术的不断发展, 单一导航方式逐渐被组合导航方

式所取代,在组合导航中,任意单一导航方式都是独立自主的,并且能够作用于自身及周围环境,每一种导航方式之间相互协调、协作,共同完成系统任务。组合导航系统不但可以完成单一导航方式所不能解决的问题,并且具有更广泛的业务领域、更高的效率、更强的鲁棒性及容错性。多传感器组合是提高导航系统定位精度和增强系统容错性的有效手段,其关键技术在于多源信息融合,其优势可以表现在密集性、有效性、互补性、冗余性、实时性、低成本性、高适应性等多个方面。同时也面临不确定、多模态、高冲突、强相关、网络化等诸多挑战。

全球卫星定位系统模块(GPS、GLONASS或北斗)和惯性传感器组成了最直接也是最常见的GNSS/INS惯性组合导航系统,其按照两套系统的融合程度可分为:松组合、紧组合和超紧组合。松组合利用卫星定位接收机输出的位置、速度信息通过线性或非线性滤波技术和惯导的推算值进行融合,此方法仅在可视卫星数大于等于4颗时才能使用。紧组合则直接利用接收机输出的可视卫星原始观测值(如伪距、伪距率、载波相位等)和惯导推算值进行融合,理论上当可视卫星数大于等于1颗时都可以使用此方法。前两种方法在很大程度上都依赖于接收机的性能,而超紧组合实现了两者的深层次协作。在卫星信号受遮挡或载体高速运动状态下,接收机极易出现失锁的情况,此时惯导系统可以辅助接收机对信号进行快速重捕获和跟踪,能从根本上提高接收机的性能。但此类型组合的前提是接收机必须对用户开放射频前端信号,在此基础上再利用接收机的输出通过松组合或紧组合模式实现导航信息的最优化估计。

NAVSOP(Navigation via signals of opportunity)是另一种利用周围环境中各种已知或未知信号辐射进行导航定位的技术。现有的卫星导航定位系统是建立在特殊的、相对脆弱的卫星信号基础上,很容易被周围环境阻断,而且基于伪卫星的干扰和欺骗技术能够很容易的对卫星接收机进行干扰并将无人载具诱导至错误的地点。NAVSOP技术利用周围一切可以识别的信号辐射(如WIFI、



无线电台、各类基站和移动电话等)来进行定位,通常这些信号的强度在局部地区要优于卫星定位系统。在未知环境中,其还能够通过获取起初未能识别的信号来建立越来越精确和可靠的定位结果,在某些情况下甚至可以利用 GPS 干扰源信号来辅助导航。这意味着该技术可以在各类复杂环境下进行定位,在外界试图破坏其制导系统时也能为载体提供良好的安全保障。惯性传感器在该组合导航系统中依旧承担系统状态递推的功能,在量测更新间隙或信号丢失时为载体提供导航信息。2010 年英国 BAE 公司联合悉尼大学的机器人研究中心在悉尼地区对 NAVSOP 技术进行了路试,实验结果表明:单独使用中波信号导航时,北向误差 10m 东向误差 17m;单独使用 GSM 信号时最大定位误差 22m;单独使用数字音频广播信号时最大定位误差为 20m;单独使用 3G 信号时最大定位误差仅为 12m;而在同时使用上述所有信号的情况下,NAVSOP/INS 组合导航系统可以获得和 DGPS/INS 系统相似的导航精度。2013 年,BAE 系统公司成功将该项技术在其“雷神(Taranis)”无人机上进行了验证。但是 NAVSOP 技术从本质上来说是建立在信号 TOA(Time of arrive)或 TDOA(Time difference of arrive)量测值基础上的,依然会受传播过程中多径效应的影响,理想情况下其理论精度和现有的 GPS 精度相似。NAVSOP 技术中用于绝对定位的信号不再是某一固定类型和某一固定频率,而是各类型信号的各个频段均有可能,这对信号接收器的天线设计提出了很高的要求,需要在有限的尺寸内覆盖尽可能多的频段。

组合导航技术中关键为多源信息融合,其中的滤波算法包括加权融合、贝叶斯方法、模糊集合方法、神经网络法和 Kalman 滤波方法等。加权融合方法将各传感器输出的信息利用加权规则得到最优估计。最简单的加权融合方法为求取传感器输出的加权平均值。贝叶斯估计方法将传感器输出用概率分布来表示,以概率准则来估计。贝叶斯方法的难点在于对概率分布的描述,特别是当传感器精度较差时,更为困难。模糊理论通过制定模糊控制规则,依据各传感器的输入估计得到系统输出信息,可以处理不

完整的信息。模糊集合法以观测所得的数据为基础,实现主、客观间的信息融合,缺点为算法的直观性不强、运算复杂。神经网络方法通过采集、学习、计算权值,获得不确定对象的推理机制。神经网络具有分布并行处理、非线性映射、自适应学习、较强的鲁棒性和容错性等特征,缺点为学习过程运算量大、寻找全局最优解困难。在众多数据融合算法中,Kalman 滤波方法最为常用,被广泛应用于各个领域,并在工程实践中发挥着十分重要的作用。

Kalman 滤波理论是由卡尔曼(R.E.Kalman)于1960年提出的,是一种从与被提取信号有关的观测量中通过算法估计出所需要信号的滤波方法。标准 Kalman 滤波方法仅能处理线性系统,然而组合测姿系统一般为非线性系统,采用标准 Kalman 滤波方法进行误差估计时,通常将非线性系统近似为线性系统进行计算,近似计算将导致误差累积,降低测量精度,严重时会影响到滤波器的稳定性。针对标准 Kalman 滤波的这一问题 Bucy、Sunahara 等人提出了 EKF,它是基于非线性状态方程和测量方程在状态预测值附近的局部线性化来实现滤波估计的。EKF 对非线性函数的 Taylor 展开式进行一阶线性化截断,忽略其高阶项,从而将非线性问题转化为线性。EKF 方法简单、灵活,可以解决多种形式测量值的估计问题。几十年来,众多学者提出了各种利用矢量观测估计航天器姿态的 EKF 实现方案。1982 年,Lefferts 对 EKF 在四元数估计中的应用进行了综合讨论。Vathsal 给出了估计姿态四元数的二阶非线性滤波算法,保留了 EKF 中的泰勒展开式的二阶近似项,使状态的估计精度和收敛速度都有所提高,但是计算较复杂,计算量也大。许多学者提出了改进算法,其中包括:高斯二阶 EKF、高斯迭代 EKF、强跟踪 EKF、自适应 EKF 等等。

组合导航系统传感器数目多,信息量大,滤波器维数高。采用集中式 Kalman 滤波方法进行数据优化处理时,计算量会随着系统状态维数的增加急剧增大,影响了系统对实时性的要求。为解决这一矛盾,1988 年 Carlson 提出了一种联邦 Kalman 滤波方法,该方法将系统分解为多个子系统,各子系统分别由各自的滤波器



进行滤波估计,子滤波器的估计结果通过一个主滤波器进行信息的融合。滤波过程中的信息是由主滤波器向各子滤波器分配,增强了对信息的利用率,消除了各子状态间的相关性,使子滤波器的估计为最优估计,设计灵活,容错性好。此外, Kalman 滤波中针对输出信号包含多种随机误差,且先验的误差模型不能准确描述的问题,提出了 Sage-Husa 自适应滤波法、交互式多模型算法等。随着人工智能理论的发展,神经网络、模糊理论等人工智能方法被应用于 Kalman 滤波方法中,很好地解决了误差模型不确定、噪声统计特性缺失等问题,成为滤波方法的重要发展方向。随着计算机计算能力的快速增长和计算成本的降低,20 世纪 90 年代兴起的粒子滤波 (Particle Filter, PF) 技术已经成为研究非线性、非高斯动态系统最优估计问题的一个热点。

同时由经验和统计理论可知,即使是高质量的原始采样数据,由于受多种偶然因素的影响,也会包含较大的随机误差,有时 1%~5% 甚至多达 10%~20%,使得数据严重偏离目标真值,从而成为异常值。在 GNSS/DR/SINS 组合导航系统中,受动态工作环境及仪器自身性能等因素的影响,容易出现一个或多个传感器状态异常。为保证组合导航系统在某个或某几个传感器异常的情况下,仍能够正常可靠地工作,有必要对数据异常值的处理方法进行深入研究。数据异常通常表现为一个突然的跳变或数据的缺失,异常值处理通常包括两部分:异常值检验和异常值剔除。一般的异常值检验方法是利用残差序列的统计特性,通过统计决策 (如双 χ^2 状态扩检验法等) 来判别是否出现了异常。目前,对异常值的修正常用滑动平均、低阶多项式滑动拟合等方法,这些方法可在一定程度上补偿异常值带来的缺陷,但效果并不是十分理想。若能通过状态预估技术,利用异常值前的历史数据预测出异常状态的目标值,再将该预测值带入组合导航系统进行状态解算,必将有效提高系统状态的可信度。预测是根据系统历史和现在的已知状态,使用一定的方法和技术去推断系统将来的未知状态。目前常用的预测方法有移动平均法、线性回归法、非线性回归法、