

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

多运动平台协同导航 的分散式算法研究

Decentralized
Algorithms of Cooperative Navigation
for Mobile Platforms

穆华 吴美平 胡小平 王飞行 著 ◇



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

多运动平台协同导航的分散式 算法研究

Decentralized Algorithms of Cooperative
Navigation for Mobile Platforms

穆 华 吴美平 胡小平 王飞行 著

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

多运动平台协同导航的分散式算法研究/穆华等著. —
北京:国防工业出版社,2015.10

ISBN 978-7-118-10261-1

I. ①多... II. ①穆... III. ①导航—分散—算
法—研究 IV. ①TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 234177 号

※

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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10 字数 172 千字

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 50.00 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

国防科学技术大学惯性技术实验室
优秀博士学位论文丛书
编委会名单

主任委员 胡小平 吴美平

委 员 杨功流 (北京航空航天大学)
陈家斌 (北京理工大学)
李四海 (西北工业大学)
徐晓苏 (东南大学)
蔡体菁 (东南大学)
刘建业 (南京航空航天大学)
赵 琳 (哈尔滨工程大学)
胡柏青 (海军工程大学)
王跃钢 (第二炮兵工程大学)
吴文启 (国防科学技术大学)

秘 书 练军想

序

大学之道，在明明德，在亲民，在止于至善。

——《大学》

国防科学技术大学惯性技术实验室，长期从事惯性导航系统、卫星导航技术、重力仪技术及相关领域的人才培养和科学研究工作。实验室在惯性导航系统技术与应用研究上取得显著成绩，先后研制我国第一套激光陀螺定位定向系统、第一台激光陀螺罗经系统、第一套捷联式航空重力仪，在国内率先将激光陀螺定位定向系统用于现役装备改造、首次验证了水下地磁导航技术的可行性，服务于空中、地面、水面和水下等各种平台，有力地支撑了我军装备现代化建设。在持续的技术创新中，实验室一直致力于教育教学和人才培养工作，注重培养从事导航系统分析、设计、研制、测试、维护及综合应用等工作的工程技术人才，毕业的研究生绝大多数战斗于国防科技事业第一线，为“强军兴国”贡献着一己之力。尤其是，培养的一批高水平博士研究生有力地支持了我军信息化装备建设对高层次人才的需求。

博士，是大学教育中的最高层次。而高水平博士学位论文，不仅是全面展现博士研究生创新研究工作最翔实、最直接的资料，也代表着国内相关研究领域的最新水平。近年来，国防科学技术大学研究生院为了确保博士学位论文的质量，采取了一系列措施，对学位论文评审、答辩的各个环节进行严格把关，有力地保证了博士学位论文的质量。为了展现惯性导航技术实验室博士研究生的创新研究成果，实验室在已授予学位的数十本博士学位论文中，遴选出 23 本具代表性的优秀博士学位论文，分成五个专题，结集出版，以飨读者。这五个专题分别是：(1)激光陀螺惯导系统技术；(2)地磁导航技术；(3)嵌入式组合导航技术；(4)航空重力测量技术；(5)自主导航理论与方法。

结集出版的目的是有三：其一，不揣浅陋。此次以专著形式出版，是为了尽可能扩大实验室的学术影响，增加学术成果的交流范围，将国防科学技术大学惯性导航技术实验室的研究成果，以一种“新”的面貌展现在同行面前，希望更多的

同仁们和后来者,能够从这套丛书中获得一些启发和借鉴,那将是作者和编辑都倍感欣慰的事。其二,不宁为是。以此次出版为契机,作者们也对原来的学位论文内容进行诸多修订和补充,特别是针对一些早期不太确定的研究成果,结合近几年的最新研究进展,又进行了必要的修改,使著作更加严谨、客观。其三,不关毁誉,唯求科学与真实。出版之后,诚挚欢迎业内外专家指正、赐教,以便于我们在后续的研究工作中,能够做得更好。

在此,一并感谢各位编委以及国防工业出版社的大力支持!

吴美平

2015年10月09日于长沙

前 言

多运动平台系统正在军事和民用领域获得广泛应用。由于导航能力是运动平台的一项基本能力,并且多运动平台协同导航具有各平台独自导航所不具有的多种优势,所以协同导航正逐步成为一个热门研究课题。由于传感器数据分布在不同的平台上,以各个平台为处理节点、不依赖单一中心节点的分散式数据结构是协同导航算法的自然选择。与依赖单一中心节点的集中式或分层式数据融合结构相比,分散式数据融合结构可以增强系统的生存能力,这对于军事应用意义尤其重大。由于分散式算法对平台间的通信要求较高,早期的分散式协同导航算法往往以牺牲精度为代价来降低通信量。随着移动通信技术的发展,设计尽量不损失精度的分散式协同导航算法具有重要的理论价值和现实意义。

作者攻读博士学位期间,在不损失精度的前提下,设计了两种多运动平台分散式协同导航算法。本书是作者上述研究工作的总结。全书共分为6章。第1章阐述了多运动平台协同导航的研究背景和意义,总结了分散式数据融合技术和贝叶斯网络推理算法的研究现状。第2章建立了协同导航的状态空间模型和概率图模型。第3章设计了增广信息滤波协同导航算法。分析了增广信息滤波的运算特点,指出状态恢复是全局运算,并给出了适合分散式实现的基于矩阵分解的状态恢复算法。第4章提出了分散式增广信息滤波协同导航算法。算法包含单平台局部数据融合和状态恢复两部分,状态恢复的求解实际上是平台间进行信息共享的过程。建立了一套分散式算法的性能评价指标,并分析了分散式增广信息滤波的各项性能。第5章提出了一种新的高斯动态贝叶斯网络推理算法。针对变量间存在确定性关系的贝叶斯网络,提出了矩参数懒惰推理算法,为高斯贝叶斯网络的推理提供了通用、直接的解决方案。针对动态贝叶斯网络的推理,设计了新的递增动态联合树算法。上述两个新算法结合起来可以对高斯动态贝叶斯网络进行推理,从而为协同导航分散式联合树算法设计奠定了基础。第6章提出了协同导航分散式联合树算法框架。分析了算法的复杂度及工作负载均衡性,比较研究了分散式卡尔曼滤波和矩参数分散式联合树算法,以及分散式增广信息滤波和分散式信息参数联合树算法。

应该指出的是,地面机器人、水下航行器、飞行器等不同平台运动特点和平台间通信能力不尽相同,虽然本书提出的分散式协同导航算法的设计思想具有广泛的适用性,但是在算法实现上要结合具体平台对象的实际特点。

借此机会,感谢我的本科和硕士生导师胡小平教授、博士生导师马宏绪教授及指导老师吴美平教授,以及在悉尼大学联合培养的指导老师 Hugh Durrant-Whyte 和 Tim Bailey。正是在他们的悉心指导下,我一步步走上学术道路,脚步由蹒跚到坚定。感谢惯性技术教研室的其他老师和学生,与他们相处,使我觉得学习和工作是一件快乐的事情。

由于作者水平有限,书中难免存在错误与不足,热忱欢迎读者批评指正。

穆 华

2015 年 1 月 6 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 多运动平台协同导航的相关研究	4
1.3 分散式数据融合技术	5
1.3.1 多传感器目标跟踪	7
1.3.2 传感器网络的校准	8
1.4 分散式协同导航算法研究	9
1.5 贝叶斯网络推理算法	12
1.5.1 算法分类	13
1.5.2 几种推理算法	15
1.6 机器人同步定位与建图(SLAM)的启示	15
第 2 章 多运动平台协同导航的数学模型	17
2.1 协同导航系统特征分析	17
2.2 协同导航的状态空间模型	18
2.2.1 单平台的状态空间模型	18
2.2.2 平台系统的状态空间模型	20
2.2.3 状态空间模型小结	21
2.3 协同导航的概率图模型	21
2.3.1 概率图模型	21
2.3.2 动态贝叶斯网络表达	23
2.3.3 马尔可夫随机场	25
2.4 小结	27
第 3 章 协同导航增广信息滤波算法	28
3.1 协同导航的高斯滤波	28
3.1.1 高斯滤波	28
3.1.2 矩参数表达	29

3.1.3	信息参数表达	32
3.2	协同导航的增广信息滤波	36
3.3	基于矩阵分解的状态恢复算法	38
3.3.1	均值恢复	38
3.3.2	协方差按列恢复	39
3.3.3	稀疏协方差恢复	39
3.4	增广信息滤波的马尔可夫随机场	40
3.5	小结	41
第4章	协同导航分散式增广信息滤波算法设计	42
4.1	单平台局部数据融合	42
4.1.1	状态添加	42
4.1.2	观测更新	44
4.1.3	状态消元	44
4.2	分布式递增 Cholesky 修正算法	45
4.2.1	矩阵的 Cholesky 分解	45
4.2.2	递增 Cholesky 修正	46
4.2.3	递增的状态恢复	48
4.2.4	分布式递增 Cholesky 修正	49
4.2.5	关于选取 Cholesky 分解算法的讨论	52
4.3	基于递增 Cholesky 修正的分散式状态恢复	54
4.3.1	递增 Cholesky 修正	55
4.3.2	状态恢复	60
4.3.3	存储管理	60
4.4	算法框架及性能分析	62
4.4.1	算法框架	62
4.4.2	性能指标	63
4.4.3	性能分析	64
4.5	仿真实验	65
4.6	比较:分散式卡尔曼滤波(DKF)	67
4.7	小结	70
第5章	高斯动态贝叶斯网络推理算法设计	72
5.1	引言	72

5.2	联合树及其构造	74
5.2.1	概率图消元	74
5.2.2	联合树的构造	76
5.3	离散贝叶斯网络联合树算法	79
5.3.1	运算定义	80
5.3.2	证据引入	80
5.3.3	消息传递策略	80
5.4	高斯贝叶斯网络信息参数联合树算法	84
5.4.1	势函数	84
5.4.2	证据引入	85
5.4.3	势函数运算	85
5.4.4	算例	87
5.5	高斯贝叶斯网络矩参数懒惰推理算法设计	88
5.5.1	研究动机	88
5.5.2	矩参数的推理特点	88
5.5.3	利用有向图信息	91
5.5.4	联合树相关操作	95
5.5.5	懒惰算法设计	97
5.5.6	算法分析	105
5.6	动态贝叶斯网络递增推理算法设计	106
5.6.1	前向界面算法	107
5.6.2	递增动态联合树算法设计	108
5.7	仿真算例	111
5.8	小结	114
第6章	协同导航分散式联合树算法设计	116
6.1	算法框架	116
6.2	算法实现	118
6.2.1	消元顺序的选取	119
6.2.2	连接树的建立	120
6.2.3	消息传递	121
6.3	算法性能分析	121
6.3.1	计算复杂度分析	124

6.3.2	通信复杂度分析	124
6.3.3	工作负载的均衡	126
6.3.4	比较:前向界面算法	127
6.4	DKF 与 DJT(M) 比较	128
6.5	DAIF 与 DJT(I) 比较	130
6.5.1	矩阵分解与消元	130
6.5.2	复杂度比较	132
6.6	综合分析	132
6.7	小结	133
附录 A	高斯分布的矩参数和信息参数表达及概率推演	135
A.1	高斯分布的矩参数和信息参数	135
A.2	边缘分布	136
A.3	条件分布	136
A.4	联合分布	137
A.5	观测融合	138
附录 B	Cholesky 分解算法	139
B.1	向上看 Cholesky 分解算法	139
B.2	向左看 Cholesky 分解算法	139
B.3	向右看 Cholesky 分解算法	140
附录 C	图论基本概念及最小生成树算法	141
C.1	一些图论的概念	141
C.2	最小生成树算法	142
参考文献		143

第1章 绪 论

1.1 研究背景

人类社会自形成以来就存在分工与协作,许多任务需要多人合作才能够完成。随着科学技术的发展,人类制造出各种具有运动能力的系统用以改进生产和改善生活,如机器人、飞行器、舰船等。这些运动系统也往往需要协作才能完成指定的任务。

(1) 协作可以实现功能上质的飞跃。例如,多个小卫星上的孔径雷达协同对地观测,可以构成一个虚拟的超高精度的合成孔径雷达^[1]。

(2) 在灾情探测和灾后搜救等紧急任务中,协作往往可以赢得时间,从而减小损失。例如,地震之后最佳救援时间是48h。48h之后,被困在倒塌建筑物中的幸存者存活的希望很渺茫。由于地震破坏程度大,所以搜救难度高,很多幸存者没有在最佳救援时间内获救而失去了生命。此外,地震对大型建筑物破坏的程度难以估计,救援人员自身的安全得不到保障。多机器人协同搜救将有助于减小被困人员和救援人员的伤亡。为建设一支能够担当紧急搜救任务的机器人队伍,美国科学基金会投资260万美元开展了一个为期5年的项目。

(3) 协同作战是今后联合作战发展的必然趋势。无人机群协同侦察、导弹编队协同打击、海上舰艇编队协同防空等都可以极大地提高作战效能。以舰艇编队协同防空为例,利用计算机、网络和通信技术,将编队内各战舰的目标探测系统、指控系统和火力打击系统等有机联系,使得编队内各舰能够及时共享所有探测器获取的目标信息,并对目标实现协同打击,其作战效能必定优于以往各自为战的海上防空作战模式。

(4) 协作可以提高故障容错与系统重构能力。例如,利用装配摄像机的多个机器人共同建立某区域基于视觉的地图,单个机器人的失效不会对全局任务产生很大影响,系统可靠性增强。

由此可见,多运动平台协同工作不是单平台的简单扩展,而是可以实现“ $1+1>2$ ”的性能提升。正如文献[2]所指出的,协同是指系统的某种内在机制(即协同机制),这种机制能够使得系统在完成指定任务时,整体性能得以加强。

多运动平台协同工作的一个基本条件是要获得每个平台的位置、速度、姿态

等运动状态的全部或者部分信息,即要求平台系统具有导航能力。下面的几个例子可以说明导航能力对多运动平台系统的意义。

(1) 多个小卫星上的孔径雷达可以构成一个虚拟的超高精度的合成孔径雷达,但其前提是小卫星要实现精确的编队飞行。因此,实时、准确地测量编队成员之间的相对空间关系,对完成编队飞行至关重要^[1]。

(2) 在救援机器人队伍的例子中,救援机器人需要首先确定自己的位置,然后才能向救援人员报告搜索到的幸存者的位置。只有获得各个机器人的位置,才能合理规划、分配搜索与救援任务。

(3) 在编队协同作战中,协同作战指挥控制体系要求实时保持各作战平台的精确联网定位,只有这样,后续的协同战术、协同探测、协同攻击才能发挥效能。以单平台为核心的作战指挥系统主要根据目标相对于单一平台的相对信息(距离、方位、仰角)实施打击,对平台本身的位置信息要求不高。而在编队协同作战中,不同平台获取的目标信息要在所有平台之间共享,一个平台打击的目标可能是本平台未捕获到的目标,这就要求编队内各平台具有精确定位能力。

多运动平台系统的导航可以通过每个平台各自进行导航来实现。每个平台的导航精度取决于自己的导航系统,与其他平台无关。这种“各自为战”的导航方式相对简单,但不能实现平台间的导航资源共享。如果平台之间存在直接相对观测或者间接相对观测,那么通过一定的信息交换,就可以实现平台间导航资源的共享,从而获得比各平台独自导航更优的性能,这种导航方式称为“协同导航(Cooperative Navigation)”^[3]。协同导航主要存在于以下两种情形。

(1) 平台间存在间接相对观测。这种情况的典型代表是利用环境特征(如路标, landmark)进行建图与定位的多个运动平台。当平台观测到所处环境中的某个特征时,可以把来自不同平台的独立观测进行有效融合,得到该环境特征更加精确的位置估计;而对环境特征的精确定位又能提高整个平台系统的定位精度。

(2) 平台间存在直接相对观测。当一个平台可以测量自身与其他平台的距离或者相对方位时,可以利用其他平台的导航状态提高自身的导航精度。平台之间互为路标,通过信息交换,共享各个平台所获得的测量信息,提高平台系统整体的导航精度。

协同导航具有下列优势:

(1) 利用系统中其他平台的高精度导航信息,装备低精度导航设备的运动平台可以提高自身的导航精度。例如,在一个机器人群中,某些机器人配备了高精度惯导系统和GPS(全球卫星定位系统),其他机器人配备了码盘和超声波传感器,如果机器人之间可以测量彼此之间的距离,那么部分机器人的高精度导航

信息可以在机器人之间共享,每个机器人的定位精度相比于独立导航时都会有所提高^[4]。

(2) 多运动平台系统中,部分平台具有有界定位误差的导航能力(导航系统中含无线电导航、卫星导航、地形匹配导航等),通过协同导航实现信息共享,可以使得系统中每个平台都具有误差有界的定位能力。例如,在进行协同导航的水下潜航器群中,某一个潜航器浮出水面进行 GPS 定位可以提高群中多个潜航器的定位精度,在减少机动能耗、增强隐蔽性的同时提高潜航器群的导航能力^[5]。

(3) 当某些平台由于传感器或环境因素丧失独立导航能力时,协同导航可以在一定程度上恢复这些平台的导航能力。如果一个平台自身的导航系统无法正常工作,但是能够和其他正常工作的平台相互通信并且进行距离或者方位观测,那么这个平台的位置可以通过协同导航来估计。

协同导航的优势是通过协同导航算法实现的。协同导航算法是一种数据融合技术,根据所有运动平台导航设备的观测信息估计各个平台的导航状态。协同导航问题的建模方式不同,相应的数据融合技术便不相同。

从结构上分,数据融合技术可以分为集中式、分层式和分散式三种基本类型,其中分散式数据融合与另外两种数据融合结构的主要区别是不依赖任何一个处理中心。对于多运动平台协同导航问题,“无中心”的分散式算法具有特别的意义。在协同导航分散式算法中,各个平台的导航设备的测量信息在本地进行局部融合,平台之间通过通信实现信息共享,从而得到每个平台导航状态的全局估计。这种“无中心”的分散式算法的突出优势在于不过分依赖于某一个平台,避免了由于单一平台停止工作造成整个系统瘫痪的系统脆弱性。也就是说,分散式算法可以增强系统的生存能力,这在军事应用领域意义尤为重大。

分散式算法的实现对平台通信要求较高,通信量一般较大^[6]。随着运动通信技术的发展^[7],通信对算法的制约越来越小。20 世纪 50 年代,微波通信开始获得实际应用。20 世纪 80 年代晚期,无线局域网产品开始投入应用,根据传输技术分为红外、扩频、窄带微波等无线局域网,其中扩频无线局域网使用最为广泛。扩频无线通信技术有跳频、直序两种实现方式,第一种实现方式的通信范围为 30 ~ 100m,数据速率达 1 ~ 3Mb/s;第二种的通信范围为 30 ~ 250m,数据速率达 2 ~ 20Mb/s。利用无线数传电台或者无线网卡组建局域网可以满足小范围内的运动载体之间的一般通信需求。联合作战中,大范围通信则可以采用数据链这种信息传输手段来实现^[8]。如 Link16 数据链被美军定为三军联合作战的通用数据链,升级后的 Link16 数据链利用自动中继可以实现超视距信息传输,通信范围达 555.9km,数据传输速率有望提高到 1.1Mb/s。近年来,无线光通信迅

速崛起,与微波通信相比,具有保密性和抗干扰能力极强、信息容量大、功耗低等优点。目前,卫星光通信成为高码率卫星通信的理想方案之一。2001年,世界首次实现了相距38000km的星间激光通信,2008年,实现了单波道5.5Gb/s的星间通信。通信技术的发展使我们在设计分散式协同导航算法时可以优先保证估计精度。尽管如此,通信仍然是分散式算法实现中最容易出现故障并且最消耗能量的部分,因此在算法设计中要尽量降低对通信的要求,增强算法的实用性。

分散式协同导航算法研究是一个开放的课题,有着重要的理论价值与现实意义。目前,分散式算法主要应用于多传感器目标跟踪、传感器网络校准和多平台协同导航等领域。在多传感器目标跟踪问题中,不同传感器对相同目标的观测是彼此独立的。在传感器网络校准问题中,待估计的各传感器偏差是彼此独立的。而在多运动平台协同导航问题中,待估计的各平台状态两两相关。就分散式算法设计而言,多运动平台协同导航问题在上述三个问题中无疑是最困难的。分散式协同导航算法的设计一方面可以促进协同导航算法的研究,另一方面可以发展分散式数据融合技术。同时,提高分散式协同导航算法的性能,可以推进对多运动平台系统在军事、民用与科学研究等领域中的应用。

1.2 多运动平台协同导航的相关研究

协同导航的研究始于20世纪末,平台对象包括室内机器人^[9,4]、室外机器人^[10]、卫星^[11,12]、水下潜航器^[5,13]等。近十年来,美国Minnesota大学以Stergios I. Roumeliotis为首的研究小组开展了一系列机器人协同定位基础理论研究,如可观性分析^[4,14]、误差分析^[15]、估计一致性分析^[16]、队形优化研究^[17]等。美国麻省理工大学John J. Leonard研究团队在依靠水面皮艇和不依靠水面皮艇两种情况下,对水下潜航器的协同定位算法进行了研究^[5,13]。欧盟资助的多水下潜航器项目MAUVs-GREX的一个研究成果是只依靠航迹推算和潜航器之间的距离测量,在不使用水声定位的情况下,实现潜航器的相对定位^[18]。L-3 Communications公司下属的Interstate Electronics Corp.研究了地球同步卫星协同导航的分散式算法^[19],同时L-3 Communications公司资助悉尼大学自主系统研究中心(Center of Autonomous System)以机器人协同导航为背景,开展了相关的分散式算法研究^[20]。

文献[4]分析了线性化的机器人协同导航系统的可观性。主要结论是当至少有一个机器人具有全局定位能力,如可以进行GPS导航时,系统才是可观的;

否则系统是不可观的。

文献[15]分析了机器人协同定位中,定位误差与机器人个数及传感器精度的关系。文中考虑的机器人在平面上运动,每个机器人装备方位测量传感器,可以进行航迹推算,机器人之间可以测量距离和相对方位。所有机器人都不具有全局定位能力,即系统是不可观的。通过推导机器人定位误差的解析表达式,文中得出以下两点结论:

(1) 协同定位误差的增长速度与机器人数目成反比。因此,机器人数目的增加可以抑制定位误差的增长,同时,单个机器人对定位误差的抑制作用越来越小。

(2) 协同定位误差的增长速度与机器人数目、里程计误差和方位测量误差有关,与机器人之间距离和相对方位测量的精度无关。

文献[21]分析了机器人协同定位精度与相关参数的关系。对于可观系统,所有机器人的稳态定位误差都是有界的,其误差上界取决于机器人之间的相对测量关系、机器人运动传感器的精度以及机器人相对测量传感器的精度,与初始定位误差无关。对于不可观系统,机器人的定位误差会随时间无限增大,定位误差上界包含两个常值项和一个时间函数项,其中一个常值项由初始定位误差决定,另一个常值项由机器人之间相对测量关系和机器人传感器精度决定,时间函数项中时间的系数取决于机器人数目和航迹推算能力,与机器人之间相对测量关系以及相对测量传感器精度无关。

1.3 分散式数据融合技术

对数据融合的结构,不同学术团体有不同的命名方式,造成了一种结构有不同的名称,而同一个名称被用来指代不同结构的现状。本书沿用牛津大学机器人研究小组在20世纪80年代末开始采用的命名方式^[22,23]并做进一步整理规范。

从结构上分,数据融合算法有集中式(Centralised Data Fusion)、分层式(Hierarchical Data Fusion)和分散式(Decentralised Data Fusion)三种基本形式。以三个节点组成的系统为例,图1.1、图1.2和图1.3分别示意了三种数据融合结构。

(1) 在集中式数据融合算法中,相关传感器的原始测量数据被传送到一个处理中心,由处理中心单独完成数据融合。这种融合结构简单、直观。但是,当传感器的原始测量数据量很大(如测量频率高或者观测量为图像)时,传送原始测量数据的通信成本将很高。此外,处理中心的故障会导致整个系统瘫痪。