

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

激光雷达/惯性组合导航系统 的一致性 with 最优估计问题研究

Research on System Consistency
and Optimal States Estimation of LIDAR/INS
Integrated Navigation System

章大勇 吴文启 著 



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科学技术大学 优秀博士学位论文丛书

激光雷达/惯性组合导航系统的一致性与最优估计问题研究

Research on System Consistency and
Optimal States Estimation of LIDAR/INS
Integrated Navigation System

章大勇 吴文启 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

激光雷达/惯性组合导航系统的一致性与最优估计问题
研究/章大勇,吴文启著. —北京:国防工业出版社,2017.2
ISBN 978-7-118-10253-6

I. ①激… II. ①章… ②吴… III. ①激光雷达
—雷达导航—惯性导航系统 IV. ①TN966

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 023800 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 205 千字

2017 年 2 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(火箭军工程大学)
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导航技术实验室,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,不宁唯是。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

以惯性导航为核心的各种组合导航技术正得到广泛的研究与应用。近年来,基于外部环境测量的组合导航模式,由于具有自主导航能力强的特点,已经成为重要的研究方向。在各种外部环境测量手段中,激光雷达具备高精度重现三维环境的能力,测量信息丰富,受复杂电磁环境影响小,采用激光雷达和惯性系统构成的组合导航系统在军事及民用领域都有巨大的应用潜力和广阔的发展前景。

本书研究了基于地标量测的激光雷达/惯性组合导航算法,对其中的关键技术和科学问题进行了深入分析,包括:地标特征提取中包含的一致性问题的优化技术、激光雷达和惯性导航系统的量测一致性问题,组合导航最优估计的可视性问题和地标混合观测下的全局状态估计问题。本书的主要工作与创新点如下:

(1) 研究了基于地标量测的激光雷达/惯性组合导航算法的基本方法,包括不同特征地标的量测方程构造、空间非线性量测的线性化滤波器建模、点云扫描的归化问题,并分析了激光雷达/惯性组合导航中主要的误差源及其对系统的影响。分析认为,一致性与最优估计问题是影响激光雷达/惯性组合导航的关键因素。

(2) 研究了参数化点云特征提取及其参数空间一致性优化方法。首先研究了基于模型驱动的空间平面和圆柱面提取方法,深入分析了三维 Hough 变换的特点,指出传统三维 Hough 变换存在参数空间分割不一致问题。在此基础上,提出了基于对偶空间分割的三维 Hough 变换,在不改变计算量的情况下实现了参数空间的一致完备分割,对偶空间分割充分利用了传统高斯分割的有效线性逼近,通过坐标旋转和重定义实现半球参数空间在测地线意义上的完备且一致分割,从而避免了多值性问题,保证了特征提取的一致性。实验表明,对偶空间分割能够唯一、有效检测半球面上任意方向的参数化地标。

(3) 研究了多尺度一致的点云局部特征提取算法。首先分析点云平滑算法,证明多尺度几何流点云平滑方法等价于三维网格上的高斯核方法,利用几何

流平滑方法建立多尺度点云,并通过特征曲率检测方法提取不同尺度下的几何局部特征。然后在多尺度几何局部特征基础上研究了相应特征描述符和匹配方法,最终实现了多尺度一致的点云局部特征提取与匹配。实验表明,算法能够应用于复杂环境下的导航地标检测和匹配,所提取特征在旋转、平移、尺度变化下能够保持一致性。同时,相比传统依赖网格的特征提取算法,本书算法的计算开销大为减小。

(4) 研究了激光雷达/惯性组合导航系统的量测一致性问题,即二者的精确空间关系标定算法。首先研究了激光雷达和惯性系统的标定几何原理;针对控制点标定模型,建立了扫描线量测修正模型,得到基于对标定区域扫描激光强度图的改正量测;利用修正后的控制点量测构建了多矢量旋转参数估计方程,引入 Wahba 姿态确定算法,将旋转参数求解转变为四元数优化问题,得到了旋转参数的全局最优解,避免了小角度假设带来的理论缺陷;并以此为基础分析了参数解的最优化问题。最后利用实际激光雷达数据进行了验证,实验结果表明,在大角度标定条件下,相比传统平差方法,算法能够提高 6.71% 的精度,并且在一定范围内随着噪声增加,优化算法的精度没有明显降低。

(5) 从理论上分析了激光雷达/惯性组合导航系统的可观性问题。利用非线性全局可观性分析方法,针对不同类型地标,从全局可观的角度推导出满足系统可观的地标观测集合,将传统 LOS 量测导航的可观性结论从局部可观推广到全局可观,放松了对地标观测的要求。数值仿真和实际实验说明本书得到的全局可观性结论可靠、有效,全局可观性分析方法对组合导航系统设计具有重要的理论价值。组合导航估计的结果表明,激光雷达/惯性组合导航系统的水平定位精度优于 5m,姿态角精度优于 0.1° ,能够满足实际使用需求。

(6) 深入研究了激光雷达/惯性组合导航系统中的全局状态估计算法。研究了基于绝对/相对地标混合观测的组合导航算法利用状态扩展实现导航参数和地标位置的全局状态估计;在此基础上,详尽分析了绝对/相对地标混合观测条件下相对地标的收敛性,指出单纯的相对地标估计为弱收敛,即多个地标之间的相对位置收敛,而具备绝对地标参与的混合观测中,地标能够强收敛到绝对位置。进一步分析了混合观测条件下导航参数的收敛性,证明系统导航参数精度在混合观测条件下最优。数值仿真表明,混合观测组合导航具有明显优势,全局状态估计算法在全程精度和最终精度上都优于单纯观测绝对地标和单纯观测相对地标的传统算法。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外激光雷达/惯性组合导航的研究现状	4
1.2.1 国外激光雷达辅助导航技术研究现状	4
1.2.2 国内激光雷达辅助导航技术研究现状	9
1.3 基于特征量测的激光雷达/惯性组合导航系统基本问题分析	10
1.3.1 基本问题分析	10
1.3.2 点云特征提取	12
1.3.3 激光雷达/惯性系统的量测一致性	15
1.3.4 基于地标观测的组合导航状态估计	16
1.4 本书的研究内容、组织结构和主要贡献	20
1.4.1 研究内容与组织结构	20
1.4.2 本书的主要贡献和创新点	22
第 2 章 基于地标观测的激光雷达/惯性组合导航算法模型	24
2.1 激光雷达测量	24
2.1.1 激光测距、扫描系统	24
2.1.2 激光雷达/惯性组合系统空间测量几何模型	26
2.2 基于地标特征观测的组合导航模型	30
2.2.1 系统状态方程	30
2.2.2 点特征条件下的观测方程	31
2.2.3 线特征条件下的观测方程	31
2.2.4 面特征条件下的观测方程	33

2.3	地固坐标系中组合导航线性化滤波模型	33
2.3.1	地固坐标系中的捷联惯性导航误差模型	33
2.3.2	地固坐标系中的线性化地标观测方程	34
2.4	组合导航地标观测的测量误差分析	35
2.4.1	激光雷达/惯性组合系统的测量误差源及对组合导航 影响	36
2.4.2	扫描归化问题及其对组合导航影响	37
2.5	本章小结	41
第3章	基于一致性优化的点云特征提取	43
3.1	基于空间一致分割的参数化特征提取算法	44
3.1.1	基于三维 Hough 变换的全局特征提取	44
3.1.2	三维 Hough 变换的空间一致性问题	48
3.1.3	基于对偶空间分割设计的三维 Hough 变换	49
3.1.4	实验验证与分析	53
3.2	多尺度一致的点云局部特征提取	61
3.2.1	多尺度理论基础	61
3.2.2	基于几何流的多尺度特征提取算法	63
3.2.3	实验验证与分析	68
3.3	本章小结	77
第4章	激光雷达/惯性导航系统的量测一致性问题研究	78
4.1	激光雷达/惯性导航系统的标定几何模型和量测方程	78
4.1.1	激光雷达/惯性导航系统的标定几何模型及参考选择	78
4.1.2	基于控制点量测的标定方程	80
4.1.3	基于小角度假设的平差法标定	80
4.2	基于控制点量测的最优标定算法	81
4.2.1	控制点量测修正策略	81
4.2.2	基于向量观测的标定算法	87
4.3	实验验证与比较	95
4.3.1	实验基本情况	95

4.3.2	实验结果分析	96
4.4	本章小结	101
第5章	激光雷达/惯性组合导航可观性分析	102
5.1	可观性概念	102
5.2	地标观测下激光雷达/惯性导航可观性分析	103
5.2.1	系统模型及地标观测分析	103
5.2.2	点地标观测下激光雷达/惯性导航的可观性分析	105
5.2.3	线、面特征地标观测下激光雷达/惯性导航的可观性分析	112
5.3	实验验证与分析	115
5.3.1	高精度惯导条件下的组合导航仿真实验	118
5.3.2	低精度惯导条件下的组合导航仿真实验	126
5.3.3	实际数据验证与分析	128
5.4	本章小结	132
第6章	基于绝对/相对地标混合观测的全局状态估计	133
6.1	基于绝对/相对地标混合观测的组合导航算法	133
6.1.1	绝对/相对地标混合观测组合导航的基本思想	133
6.1.2	导航参数和相对地标联合状态估计	134
6.2	混合观测条件下系统状态收敛性分析	138
6.2.1	相对地标的位置收敛性	139
6.2.2	混合观测条件下导航参数的收敛性分析	144
6.3	混合地标观测组合导航系统实验与分析	146
6.3.1	实验方案	146
6.3.2	实验结果与分析比较	147
6.4	本章小结	154
第7章	结论与展望	156
7.1	本书总结	156
7.2	研究展望	158

附录 A 坐标系定义及地球模型参数.....	159
A.1 常用坐标系的定义	159
A.2 常用坐标系的相互转换	159
A.3 地球模型参数	160
附录 B 矩阵求逆公式.....	162
附录 C 几种典型全三维扫描激光雷达.....	163
参考文献.....	166

第1章 绪 论

1.1 课题研究背景及意义

惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)通过陀螺仪和加速度计测量载体相对于惯性空间的旋转和平移运动,结合地球几何形状与重力场等大地测量结果和航迹推算方法,实现了空间中实时连续的三维定位和定向,具有高度的自主性、隐蔽性和信息的完备性^[1, 2],在航空、航天、航海、陆地导航等领域已成为重要的核心导航设备。

尽管惯性导航系统具有连续且完备的导航信息输出,但受初始对准的精度、惯性器件的误差以及运载体运动的动态特性影响,惯性导航系统存在误差随时间累积的缺陷,不利于长时间导航。为了抑制惯性导航系统的误差积累,各种组合导航技术随之产生。组合导航的基本思想是充分利用多种传感器提供的信息互补,从而达到提高导航系统的精度和鲁棒性的目的。一般来说,以惯性导航为核心的组合导航模式有如下几个特点:

- (1) 以导航参数或导航参数误差和传感器误差参数作为状态变量。
- (2) 利用惯性信息构造系统运动学模型。
- (3) 能够以一定规律和原理获取外部测量信息。
- (4) 以运动学模型和外部测量信息为基础建立状态滤波器,进行状态估计^[3]。

以上几个特点构成了组合导航的基本框架。从中可以看出,除惯性导航系统本身外,决定组合导航性能的还主要有两个方面:①外部测量信息的性能,受所采用外部信息的类型和精度水平限制;②状态滤波器的性能,即滤波器能达到的精度和稳定性等指标。

最常见的组合方式是惯性导航系统和全球定位系统(Global Position System, GPS)组合进行导航,通过卫星提供的位置或其他信息参与滤波解算,惯性/卫星组合能够长时间保持较高的导航精度。但在许多条件下,尤其是军事应用中,由于战场电磁环境复杂,以无线电信号传输为基础的卫星定位系统抗干扰能力低,一部低成本干扰机足以使较大范围内的接收机异常,从而导致组合导航失

效。此外,环境的复杂性也可能导致接收机信号屏蔽或中断,如载体在隧道、森林、城市高楼区域运动时,往往存在接收机信号丢失的情况^[4]。这充分说明必须研究抗干扰能力强的组合导航方法。目前,不依赖导航卫星的组合导航模式,由于具有自主导航能力强的特点,已经成为重要的研究方向。

当前得到广泛研究的几种不采用导航卫星量测、抗干扰能力较强的组合导航方式如表 1.1 所示。

表 1.1 抗干扰性较强的组合导航方式比较

组合方式	测量信息	优点	缺点
天文/惯性 ^[5]	天体视位置、恒星向量	完全无源、获取容易	受天气状况影响明显,定位精度较低
位场/惯性	地球位场: 地磁值、重力值 ^[6] 等	全自主、全空间有效	精度有限,高精度基准图获取困难
地形/惯性 ^[7]	雷达地形测量	能独立工作	在无明显地貌特征区域无效,需要复杂路径规划
视觉/惯性 ^[8]	数字图像	被动工作、获取方便、 精度高	对数据依赖程度较高,三维向二维投影损失深度信息,受天气状况影响明显

以上几种组合导航方式具有共同点,即它们均测量载体的外部环境信息(无论是地形地貌、星空或者地球位场),外部环境信息本身和测量手段的抗干扰能力都比较强。目前,天文/惯性组合导航主要应用于战略武器制导系统,如弹道导弹和战略轰炸机,系统组成一般比较复杂,成本也比较高;位场/惯性组合系统是近年来受到广泛关注的一种组合导航模式,隐蔽性好,能在水下工作,但精度还比较有限,主要应用在水下导航领域;地形/惯性导航是一种历经实战考验的组合导航方式,合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)/惯性组合导航也属于这一类型,这种方式在巡航导弹上应用比较广泛;得益于计算机处理能力的进步,视觉/惯性导航在近年也得到蓬勃发展,其应用涵盖导航、末制导等多个方面,应用前景广阔。视觉/惯性组合导航之所以受到欢迎,是因为其比较好地描述了载体的外部环境及相对关系,但视觉/惯性导航对深度信息描述有限,说明其信息是不完备的,也在一定程度上限制了其应用。

近年来,随着激光技术的快速发展,激光雷达应运而生^[9]。激光雷达是“光探测和测距”(Light Detection and Ranging, LIDAR or LADAR)的简称,其工作原理与无线电雷达比较相似,也是由雷达发射系统发送脉冲信号,经目标反射后被接收系统收集,通过测量反射激光的运行时间确定目标的距离。激光雷达之所

以受到关注,是因为其具有一系列独特的优点:具有极高的角分辨率、极高的距离分辨率,速度分辨率高,能获得环境的三维信息,抗干扰能力强,比微波雷达的体积和重量小等。

激光雷达每发射一个脉冲即能得到一个测量点,随着测量点的增加,就形成了描述外部环境的三维点云(Point Clouds)。利用每个脉冲对应的激光脉冲视线信息(Line of Sight, LOS),就能计算测量点在激光雷达坐标系中的位置,从而得到点云在激光雷达坐标系中的描述。由于激光雷达获取三维点云的有效距离和精度都远远高于传统的多目视觉系统,这一优势使其能完备而精确地测量、描述外部环境,并且抗干扰能力强,这一点非常符合自主式组合导航的应用需求。图 1.1 给出了典型地面和空载激光雷达扫描示意图及扫描结果^[10, 11]。

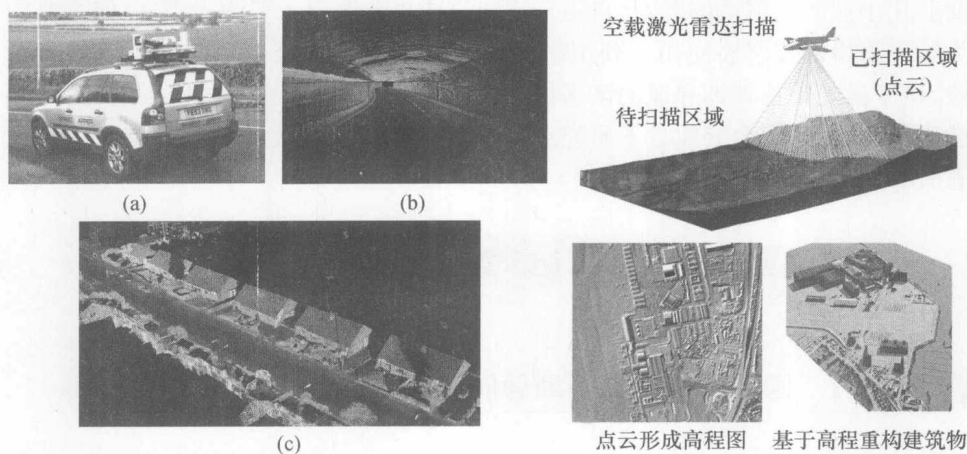


图 1.1 地面和空载激光雷达及其扫描结果
(a) 地面扫描系统; (b) 对隧道扫描点云; (c) 对街道扫描点云。

激光雷达最初应用在测绘领域,主要装备在机载测量系统上进行地面高程测量^[12]。随着激光雷达自身不断小型化和模块化,其用途越来越广泛,研究人员开始探索激光雷达进行障碍检测、侦察、导航的潜力。激光雷达从测绘领域进入导航领域的最初阶段,主要应用于同步定位与测图(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)技术中^[13],承担避障识别、道路检测、环境识别、地图创建等任务。随即研究者意识到激光雷达对环境特征的描述能力有助于导航任务的完成,从而开始研究基于激光雷达辅助的组合导航技术。近几年来,基于激光雷达/惯性信息的组合导航技术得到快速发展,2010年召开的 IEEE PLANS (Position, Location and Navigation Symposium)就在会议中开设了激光雷达组合

导航分会场^[14]。美国 DARPA 实验室深入探讨了激光雷达在无人机、无人车、无人舰艇等多方面的应用价值^[15],认为经过精心设计的激光雷达能够实现地形扫描、障碍规避、自主定位、目标识别、末端打击制导等多项任务,是中低空无人机、自主车、小型无人舰艇的重要战场感知设备。美军的多个型号无人机已经装备了激光雷达作为侦察设备,如 LASSCO 无人机能利用激光雷达实现侦察、定位一体化功能。DARPA 实验室每年举行的自主车大赛也极大地促进了激光雷达辅助导航技术的发展^[16]。发达国家的诸多成功应用表明,激光雷达辅助导航技术具有极大的应用价值并受到广泛关注,必将在今后一段时期内得到大力发展。

激光雷达技术进入国内已经有近 20 年历史,但主要应用在测绘领域。随着商业化小型激光雷达的普及,自主车研究方向也普遍引入了激光雷达,但主要作为障碍物检测传感器使用。利用激光雷达辅助导航研究在国内尚处于起步阶段,鉴于激光雷达辅助导航的诸多优点,尤其在军事领域应用的巨大潜力,开展激光雷达/惯性组合导航技术研究对国民经济和国防现代化建设都具有重要的意义。

1.2 国内外激光雷达/惯性组合导航的研究现状

1.2.1 国外激光雷达辅助导航技术研究现状

激光雷达辅助导航技术的发展和激光雷达本身的发展密切相关。20 世纪 70 年代,激光测高技术首次应用到“阿波罗”登月计划中^[17]。进入 20 世纪 80 年代,NASA(美国航空航天局)主导的大气海洋激光雷达系统和机载地形测量设备研制成功后,激光雷达也随之进入了工程化、实用化阶段^[18]。基于激光雷达的高精度三维空间数据测量,进一步为激光雷达应用于导航领域打下了基础^[19]。

传统机载激光雷达系统大多结构复杂、体积大,但近年出现了结构紧凑、成本低的小型激光雷达,如 SICK 公司制造的多款线扫低成本激光雷达已经成功运用于无人车、移动机器人中^[20],为激光雷达辅助导航提供了丰富的资源。

除了激光雷达硬件系统本身,对激光测量数据的处理也得到了长足发展。尤其是对激光扫描形成点云数据的分类、分割、提取等^[21]。荷兰 Delft 大学通过与影像数据结合,实现了植被、建筑物自动分类和识别^[22]。文献[23]利用激光雷达在跟踪环境特征避障的同时实现短程导航。尽管各种数据处理算法层出不

穷,但激光雷达数据处理仍然是一新兴领域。

以组合导航基本原理为基础,激光雷达/惯性组合导航主要有三种模式:①地形匹配的空载激光雷达辅助模式;②地面系统的激光雷达扫描匹配辅助导航;③基于几何特征(地标)的激光雷达辅助导航,即基于特征地标的滤波估计模式。下面对这三种模式进行简要综述,分析其各自存在的优缺点。

1.2.1.1 基于地形匹配的空载激光雷达辅助导航

早期的激光雷达采样率低、覆盖面积小,在一定程度上只能作为激光测高计使用,因此自然发展了基于激光雷达的地形匹配导航技术。1980年,美国UT公司开发了利用简易激光雷达计算飞机速度的系统,通过向地面发射激光脉冲,系统能够精确测定飞机的对地速度,精度达到 $1 \sim 2 \text{ cm/s}$ ^[24]。正是通过这一系统,美国军方意识到激光雷达在地形匹配导航中的潜力,开始探讨激光雷达作为地形导航设备的可能性^[25]。

进入20世纪90年代,真正意义上的空载激光雷达辅助地形匹配导航系统开始出现。Dornier Luftfahrt公司在一项专利中提出利用往复扫描模式的激光雷达获取距离影像(Range Image),通过距离影像来实现匹配导航^[26],并在其中应用了成熟的图像处理算法,如边缘提取等。但由于激光成像的扫描点比较稀疏,构成的激光脚点图像存在较大插值误差,因此系统精度不高。

随后,BAE公司提出了基于前向扫描激光雷达的地形匹配导航系统。系统通过两个转镜实现垂直方向 $3^\circ \sim -22^\circ$,水平方向 $\pm 25^\circ$ 的全地形扫描,并利用地形数据匹配导航^[27]。BAE公司称其系统取得了较好的导航精度,但由于保密的原因,没有给出任何相关数据。BAE公司开发的CVS系统(Continuous Visual Navigation)是一个基于前视/下视图像的导航系统,在其中也探讨了基于激光雷达辅助导航的模式^[28],通过地形匹配定位并修正惯性导航误差,据称精度达到约50m。

俄亥俄大学构建的激光雷达辅助导航系统ALSTerrain则更加成熟^[29](图1.2),利用Honeywell HG1150型激光捷联惯性导航系统、Riegl ALS LMSQ140i激光雷达,系统实现了实时地形匹配导航,匹配算法采用了精确地形辅助导航(Precision Terrain Aided Navigation, PTAN)地形匹配算法^[30]。利用DC-8实验飞机,ALSTerrain系统进行了多次实验。在2005年的一次实验中,ALSTerrain系统实现了水平精度优于10m,垂直精度优于5m的导航结果,但其前提是需要精确测定飞行区域的数字高程地图(Digital Elevation Map, DEM)。相关报告指出,一旦实际DEM与存储DEM存在差异,地形匹配精度将出现较大误差。