

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.04.001

多无人机协同导航技术研究现状及进展

许晓伟, 赖际舟, 吕 品, 樊刘伦

(南京航空航天大学导航研究中心, 南京 211106)

摘要: UAV是无人驾驶飞机(Unmanned Aerial Vehicle)的简称, 无人机相较于有人驾驶飞机具有用途广泛、成本低和生存能力强等特点, 在军事民用领域都有着广阔的前景, 受到了国内外研究者的关注。协同导航技术极大地扩展了无人机的应用范围, 提高了多无人机定位的精度以及无人机编队的稳定性、安全性和可靠性。现阶段协同导航技术在编队导航、目标监测与跟踪等诸多方面都得到了研究与应用。从四个层次对协同导航的研究现状和进展进行探讨: 首先是对多无人机协同导航的概念、基本原理、国内外发展现状和必要性进行阐述; 其次对协同导航中相对导航方式进行了分类分析, 并分别介绍了无线电导航与视觉导航的原理、优缺点和应用场景; 然后从导航目的、协同导航优化算法、滤波方法、协同导航信息融合容错策略几个方面对协同导航进行分析归纳; 最后, 讨论了基于多无人机协同导航未来的发展趋势。

关键词: 协同导航; 视觉导航; 无线电导航; 信息融合; 卡尔曼滤波

中图分类号: V249.31

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2017)04-0001-09

A Literature Review on the Research Status and Progress of Cooperative Navigation Technology for Multiple UAVs

XU Xiao-wei, LAI Ji-zhou, LV Pin, FAN Liu-yi

(Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: UAV is an abbreviation for Unmanned Aerial Vehicle. Compared with manned vehicle, UAVs have characteristics of wide-range in application, low cost and strong survival ability. Because of the broad prospect in the military and civilian field, researchers are attracted by UAVs both at home and abroad. Cooperative navigation technology has greatly expanded the scope of UAVs applications. It can not only improve positioning accuracy of UAVs, but also for the stability, security and reliability. Recently, cooperative navigation technology has been researched and applied in the aspects of formation navigation, target monitoring, tracking and so on. The research status and progress of cooperative navigation technology are divided into four levels in this paper: cooperative navigation concept, basic principles, development status and necessity would be described in the first part; secondly, the relative navigation methods in cooperative navigation are classified and analyzed, mainly including principles, advantages and disadvantages, application scenarios of radio navigation and visual navigation. Then, the cooperative navigation is summarized from the aspects of navigation purpose, cooperative navigation optimization algorithm, filtering method, information fusion and fault-tolerant strategy. At last, key problems and development trend of multi-UAVs cooperative navigation are discussed.

收稿日期: 2017-05-21; **修订日期:** 2017-06-17

基金项目: 江苏省六大人才高峰项目(2015-XXRJ-005); 江苏省研究生培养创新工程(KYLX_0284)

作者简介: 许晓伟(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事无人机协同导航及多信息融合容错导航技术方面的研究。

E-mail: xuxw@nuaa.edu.cn

通讯作者: 赖际舟(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事多传感器融合、卫星定位和组合导航技术。

E-mail: laijz@nuaa.edu.cn

Key words: Cooperative navigation; Visual navigation; Radio navigation; Information fusion; Kalman filtering

0 引言

20世纪70年代,物理学家哈肯创立了协同理论,该理论指出,如果一个系统内部的各子系统能够相互协调配合,就可以产生“1+1>2”的协同效应^[1]。因此,协同导航技术作为一个新兴的研究方向受到了诸多研究者的关注,通过协同导航技术利用多无人机传感器之间的信息交互,以实现多无人机的信息协同,从而提高其定位的精度,弥补了导航传感器的误差,并且对可能出现的故障进行识别、隔离和恢复,保障多无人机的任务执行力。目前,协同导航技术发展迅速,已经被广泛应用于军事领域,例如各军种的联合作战、蜂群作战。同时,该技术也在向民用化发展,例如无人机群的协同灯光表演、无人机快递递送业务。

协同导航的研究起始于20世纪末,其应用平台相当广泛,包括水下无人器、无人机、卫星以及陆地机器人等^[1]。除此之外,基于信息协同而实现的多无人机编队利用多无人机之间的空间相对位置的变换,提高无人机的应用范围、工作效率和扩展无人机的功能。例如实现自主空中加油,在僚机的尾迹涡中的高效率飞行以及提高多无人机的隐蔽性^[2]。现有的传感器大多依赖于GPS的辅助,战争环境时变性、动态性、随机性极有可能导致GPS信号不可用或者不可靠。协同导航通过多传感器的信息协同,提高定位准确性与可靠性。正是由于协同导航的诸多优势,获得了研究者的广泛关注。

以美国为首的西方国家在协同技术的发展上起步较早,拥有较多的研究成果。很多研究成果已经通过了测试而转入实用阶段。早在20世纪80年代,美国就研发了联合战术信息分布系统(Joint Tactical Information Distribution System, JTIDS),在1991年海湾战争中,美军全面采用该系统进行作战,通过数据链使战术战位之间进行数据交流,实现了海陆空作战一体化。美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)十分重视协同技术的发展,于2015年提出在拒止环境中协同作战(Collaborative Operations in Denied Environment, CODE)项目,旨在使多无人飞行器在磁屏蔽环境下通过信息协同

动态地远程地对移动的目标进行精确打击。CODE工程专注于对无人机协同作战的能力,这些无人机会不断地估计自己的位置环境给决策者,使决策者获得全面的情报信息^[3]。西班牙塞维利亚大学机器人视觉控制小组一直致力于移动机器人和传感器网络的研究,过去10年内研究了利用传感器和多机器人的协同合作,这种不借助于外部传感器的定位方法具有较强的鲁棒性,是最近研究者关注的热点^[4]。

我国协同导航技术起步较晚,中国空气动力研究与发展中心针对无人机协同覆盖路径规划、多无人机协同轨迹规划算法进行了深入的研究。南开大学计算机工程学院通过研究无人机的物理特性获得了大量的成果,提升了无人机的并行性和容错能力,并且设计了多无人机系统规划的最优控制模型^[5-6]。由此可见,国内外学者对协同导航的重要性已有了充分的认识。

1 多无人机协同导航的概念及意义

无人机近几年在军事民用领域扮演了越来越重要的角色,既能够自主实现对作战目标的查打一体,也可以用于民用的航拍。协同导航技术是多无人机自主飞行的可靠保障。由于无人机有续航、载荷、大小和隐蔽性等诸多限制,很多高精度的传感器无法搭载。在复杂环境下,导航系统又必须在要求的运行时间和范围内提供可靠并且准确的导航信息。与单架无人机相比,多无人机协同可以优化任务分配,提升执行任务的表现,提高定位精度,减少实行任务的时间,与此同时还可以提高多无人机系统效率和安全性^[7]。

协同导航是一项综合性的技术,贯穿多无人机整个飞行过程的始终,本文将从多无人机组成的编队构型、相对导航方式、协同定位算法以及编队故障的诊断与容错四方面进行论述。一般的协同导航结构如图1所示。

多无人机协同导航系统的信息通信结构直接影响了导航精度^[2]。多无人机协同导航方式通常分为主从式和平行式两种(见图2),常见的Leader-Follower就是典型的主从式结构。主从式多无人机的编队包括单主、多主等结构,通常主从式结构的无人机编队通过长机高精度的传感器信息与配

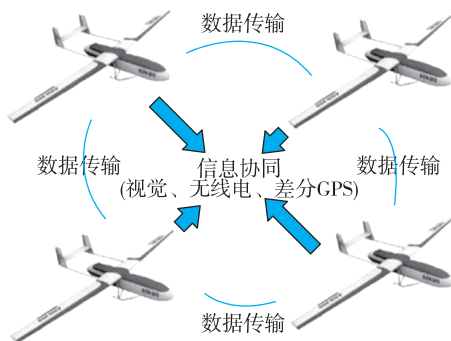


图 1 协同导航示意图

Fig. 1 The chart of cooperative navigation

备低精度传感器的僚机进行共享。僚机利用长机的导航信息并通过相对位置测量对自己的位置进行估计,从而提高无人机编队的整体定位精度。平行式结构则是通过多无人机直接信息广播,实现信息共享,通过相互距离测量进行自身位置更新。

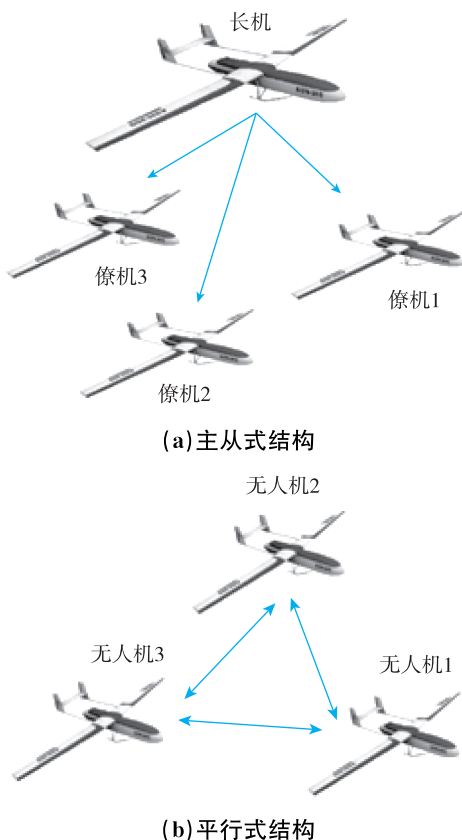


图 2 协同导航结构图

Fig. 2 The chart of cooperative navigation structure

2 相对导航方式的研究及进展

相对导航方式是实现协同导航技术多机协同的重要手段,在无人机协同导航中飞行器之间的信息一般通过相对导航方式获得,相对导航方式的应

用是无人机群在复杂环境下实现协同导航的重要手段。本文所研究的协同导航的应用对象是多无人机组成的编队,由于在多无人机组成的编队中各无人机的相对距离较近,在此背景下,相对导航传感器相对于绝对导航传感器能够实现更高的定位精度、更强的抗干扰能力以及更低廉的成本价格。本节将对无人机的相对导航方式结合图 3 所示的分类进行具体阐述。

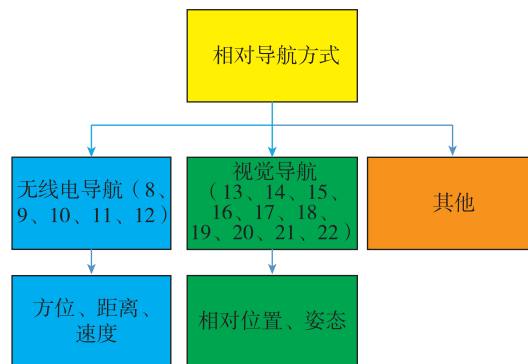


图 3 相对导航方式分类图

Fig. 3 Classification chart of relative navigation method

2.1 无线电导航

无线电导航是现代航空中最为基本,同时也是最为核心的协同导航手段,可以全天时全天候实现相对位姿测量,而且具有定位精度较高、定位速度较快等优点,因而无线电导航也优先被应用在了相对导航方式中。无线电导航包含了 GPS、雷达、UWB 等利用无线电波的导航技术。GPS 导航利用多颗卫星对目标进行定位,是目前最常用的导航定位手段,但是由于其误差较大,通常在米级,无法适用于紧密多无人机的编队以及精度要求较高的队形变换,因此需要采用合适的方法提高其导航定位精度以满足相对导航的需求条件。雷达导航利用电磁波在介质中沿直线传播的传播特性,通过测量无线电信号幅度、频率和相位,根据角测量原理或者距离测量原理测得无人机之间的相对角度和距离,进一步可以解算出速度、位置和姿态信息,最终可以实现相对导航。针对 GPS 相对导航的问题, Hedgecock W 等提出 GPS 相对跟踪法 (Relative GPS Tracking, RegTrack), 通过 GPS 推导多接收机的相对位置信息,网络中的节点通过分享它们的原始卫星测量数据并利用这些数据追踪邻近节点的相对运动对比计算出自身的绝对坐标,由于无关测量误差的存在,该方法比简单采用节点绝对坐标

或其他常规方法的精度高出了1个数量级以上^[8]。Gross J N等针对无人机近距离编队飞行问题,提出了一种全新的基于载波相位差分GPS以及无人机自身惯导系统的传感器融合算法,该算法借助超宽带无线电测距技术,通过信息融合加强载波相位差分GPS相对导航的鲁棒性^[9]。

在利用雷达的相对导航方面,Strader J等针对在同一高度下的2架无人机提出了一种无需先验信息,仅通过测距雷达和飞行器机载导航系统测量距离信息就可以估计相对姿态的方法。该方法假设系统在没有噪声的情况下,从无线电测量构造出的图形中推导出姿态的分析解,再使用非线性最小二乘法从噪声范围和位置位移测量中估计出相对航向和方位,并针对各种轨迹对测量噪声的灵敏度进行分析^[10]。Tseng P H等针对视距与非视距混合环境下的多移动单位协同自主导航技术进行了研究,推导贝叶斯递归优化算法,基于到达时间(time-of-arrival, TOA)对位置和信道环境进行联合估计^[11]。Quist E B等提出了一种雷达测距算法,在GPS信号丢失的情况下,该算法能够减小航位推算漂移率,改善IMU产生的导航误差,从而提高导航精度,并通过雷达捕获的实际室外飞行数据对算法的有效性进行了验证^[12]。无线电导航具有良好的技术基础,在相对导航的应用中主要难点在于高精度相对导航算法的设计以及对测量噪声的过滤,对导航信息的计算与融合则是接下来研究的重点。

无线电传感器作为一种主动探测方式,可以感知无人机之间的相对距离和角度,为多无人机的协同导航提供了新的思路,从而保证无人机编队协同导航的可靠性与准确性。

2.2 视觉导航

视觉导航是近年来国内外导航领域的研究热点。视觉传感器由于其体积小、价格低廉并且能够提供丰富的信息,所以使用起来较为高效。由于无人机在执行侦查、监测等任务时自身就会搭载视觉传感器,因此采用视觉导航的方式不会占用无人机额外的空间。在视觉导航方式中,装载有视觉传感器的僚机或者长机能够对感知范围内的某架或多架无人机的特征信息进行连续捕获,并对特征信息进行匹配与跟踪,估计出自身的运动状态,从而对惯性导航信息进行修正并在相对坐标系或绝对坐标系中确定自身的位置。在利用视觉传感器实现相对导航时,飞行器的位置信息完全由视觉传感器提供,对视觉信息的分析

结果将直接影响到飞行器的飞行轨迹,因此其关键技术就体现在对特征信息的精确捕获和跟踪以及与惯性导航信息的高精度融合。

视觉相对导航方法首先要解决的是对特征信息的捕获和跟踪问题,因此需对视觉导航方式进行建模,研究者们针对不同的应用环境提出了相应的视觉导航模型。针对GPS拒止的环境,J. Hardy和Leishman R C分别提出了一个全新的视觉导航模型,用来估计无人机相对姿态^[13]。J. Hardy等设计的模型以分层统计算法为索引方案,确定了机载双摄像头中的重叠覆盖部分,采用非线性卡尔曼滤波计算出无人机的相对位置姿态。Leishman R C等提出的模型的核心是将乘法扩展卡尔曼滤波与视觉SLAM相结合,与一般的总体状态估计的方式不同,该模型保持MEKF位置和偏航对目前地图节点的相对状态,该相对导航方法对地图边界和协方差进行了直观定义,在需要时使用全局一致地图的设计也使模型更具灵活性^[14-16]。针对多机协同空中加油问题,Khansari-Zadeh S M等设计了基于神经网络的视觉估计与导航算法,并通过详细的建模和完整的飞行器动态性能六自由度虚拟环境非线性仿真对算法可靠性进行了验证^[17]。Meng D等设计了一种基于视觉的空中加油机与无人机的相对姿态估计方法,该方法结合了定位参数初始化与正交迭代法,估计旋转矩阵与转换向量的最优解,并讨论了该方法中特征点数量与配置对估计结果精度的影响^[18]。针对长机与僚机之间没有信息交流的情况,Seung-Min Oh等设计了一款基于视觉的导航系统,使用无迹卡尔曼滤波对目标方位角、目标仰角、目标对角视觉信息进行信息融合,得到相对运动估计,实现了长机与僚机之间的相对导航^[19]。

建立合适的模型是实现多无人机视觉导航的基础,进一步提高视觉导航的精确性与鲁棒性就需要研究结合视觉导航和惯导信息的融合问题。Fosbury A等使用四元数法将全局姿态参数化,由三维姿态表示法给出当地姿态误差,再使用扩展卡尔曼滤波估计2架无人机之间的相对位置和姿态。通过该方法可以确定最优轨迹并提高系统估计的精确度^[20]。在文献[20]的基础上,崔乃刚等针对视觉导航输出延时的问题,提出了一种视觉与惯导相结合的相对导航方法,采用无迹卡尔曼滤波对相对惯导信息和相对视线矢量信息进行融合,从而更加精确地估计出机与机之间的相对位置、相对速度、相对

姿态等相对导航信息^[21]。Park J S 等为了解决如何提高无人机姿态估计的精度与鲁棒性的问题提出了两步方案,首先采用一种非线性最小二乘算法,并通过卡尔曼滤波减少信标方位特征的噪声;其次结合相对姿态运动学和相对位置方程设计了一种相对导航滤波器,二者相结合,达到提高精度与鲁棒性的目的^[22]。视觉相对导航技术近年来以研究模型的建立和信息的融合为主,其技术基础已相对成熟,而对视觉导航中误差的特性分析与传递方式的研究相对较少,如何进一步分析误差、消除误差以提升导航技术的精确性是今后研究的方向之一。

视觉作为协同导航位姿测量最直接的传感器,为无人机编队提供了可靠的相对位置姿态信息,每个无人机都可以利用视觉传感器估计其他无人机在自身坐标系的相对位置和距离。在存在 GPS 信号情况下,这些导航信息也可以在惯性坐标系内估计。视觉导航不需要无人机之间的相互通信,是复杂环境下协同导航的重要手段。

3 多无人机协同导航算法的研究与进展

随着协同导航技术研究的深入,通过对初期的算法进行大量改进,在简化算法过程的同时,提高导航数据的准确性,同时减少数据计算量、降低系统延时,能够为多无人机编队提供实时的必要导航信息,为多无人机的协同导航提供坚实的基础。多无人机的协同导航优化算法大致可以分为协同导航的数理优化算法、基于图论的协同导航算法以及基于滤波估计的数据融合算法(见图4)。

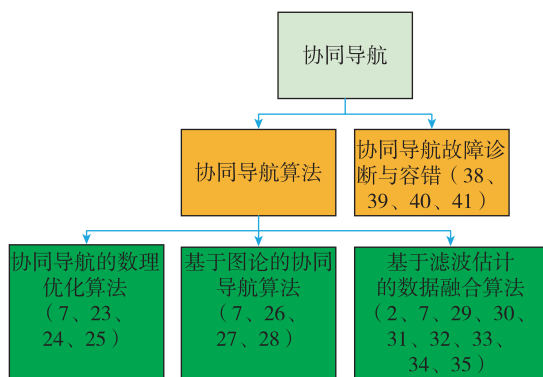


图4 协同导航优化算法分类

Fig. 4 Classification chart of cooperative navigation optimization algorithm

3.1 协同导航的数理优化算法

通过优化算法对协同导航信息进行求解,通过

不同的数理优化方法对协同导航信息进行推导从而获得相对可靠的导航信息估计。研究者通常利用极大似然估计、最小二乘法等数学算法对协同导航位置姿态求解,提高协同导航算法的准确性,减少计算复杂程度。

文献^[23]采用内部和外部信息的传感器对机器人自身状态参数进行收集、传播和更新,通过分布式估计方法,将一个主滤波器的卡尔曼滤波方程分配到各个子滤波器中,也就是将编队内的各子机器人都看作一个子系统进行卡尔曼滤波运算,从而实现对各机器人位置的推算。这种分布估计可以实现最少的数据传输和处理过程,但存在传输延时、数据丢失和全局认知困难等问题^[7]。文献^[24]则采用集中式的协同导航结构,能够在系统层面获得机器人的位置姿态信息,有利于机器人之间的相互协作。通过引入阈值窗口,根据自身定位不确定性的高低采取不同的校正策略,避免分布式方法在建立地图时各地图相对独立、难以获得全局信息、各机器人运动规划存在局部最优限制等缺点;但也存在过于依赖长机的问题,一旦长机故障,导致编队瘫痪。文献^[25]根据距离测量模型以及简单的几何建模,通过最小二乘法获得一个非凸估计函数。通过极大似然估计对2个传感器的距离进行推算,解决了在3D无线传感器网络中目标的协同定位问题。由于计算的复杂性,文献^[25]同样使用了分布式的策略,由本地子系统对估计过程进行运算,将各平台的信息进行分别估计,进而获得相对准确的位置估计。

3.2 基于图论的协同导航算法

图论就是将一个特定集合内的目标通过数学结构对对的目标关系进行建模的方法^[7]。图中的每个节点都被认为是一个媒介,它可以和一些或者全部的媒介进行信息交换。针对路径跟踪准确性不足的问题,文献^[26]将多载体的动态系统通过信息图建立成一组能够信息交换的动态子系统,从而提出了一种协同路径跟踪控制方法。为了提高协同导航的定位精度,文献^[27]同样应用基于图论的建模方式讨论多无人机的定位问题,当知道2个无人机之间的距离和2个已知位置信息的地标与载体的夹角时,通过全局刚性结构理论,对多无人机进行相对定位。文献^[28]设计了一种基于视觉的协同导航定位算法,它利用多个无人机对同一目标进行不同角度的拍照,当一架无人机需要获得自己的

位置时,通过自身拍摄到的图像和其他无人机拍摄的2幅图像进行比较,通过图像内含有的各无人机的导航信息和特征区域的比较进行导航信息的更新。研究者建立了一个有向非循环图,通过组内无人机平台进行图的本地维护,每当获得量测信息时,则根据该图计算导航参数与图像相关的互协方差项。无人机所需要的传感器仅为视觉传感器和惯性测量单元,不需要任何先验信息,提高了多无人机的编队内定位精度较差的无人机的定位精度。

3.3 多无人机协同导航的滤波估计算法

信息融合估计是多无人机协同导航算法中关键的一环,本节结合了国内外不同学者的研究成果,对无人机间的信息融合滤波方法进行相关的分析。

卡尔曼滤波是协同导航中最常见的融合算法之一,通过迭代预测和补偿,将会有效地消除误差。其中主要分为原始卡尔曼滤波算法(KF)、扩展卡尔曼滤波算法(EKF)和无迹卡尔曼滤波算法(UKF)。KF主要针对线性高斯情况。EKF则是针对非线性高斯模型,它将非线性部分进行一阶泰勒展开,忽略了高阶项。UKF则结合了UT变换和KF,计算精度较高。KF作为原始滤波方式,得到了很多研究者的关注,其中文献[29]将每个无人机的六维状态向量提供给卡尔曼滤波器,将观测方程建立在在地心惯性坐标系,将无人机的相对位置和相对距离作为观测测量进行卡尔曼滤波。为了减少数据融合的计算量,文献[29]还提出了将最小二乘误差法与卡尔曼滤波相结合的方式,将卡尔曼滤波算法建立在最小二乘误差法的输出上。首先通过最小二乘误差法对预处理阶段进行粗估计,然后通过卡尔曼滤波进行进一步的噪声消除。计算时间减少到原来的2.5%且拥有相同的精确度。KF适用于线性高斯问题,但现实世界中,大多都是非线性的,而通过线性近似很容易解决非线性问题,相较于UKF,EKF消耗较少的内存和时间资源。文献[30]利用扩展卡尔曼滤波对非线性的无人机状态和协方差进行快速更新。由于所有基于扩展卡尔曼滤波都是估计随机变量、参数化均值和协方差,假设传感器噪声是零均值,白噪声。如果噪声观测状态不够准确,会导致误差累计,致使滤波器发散,而且它需要大量的建模参数以及需要通过手动调节。所以文献[31]提出了一种基于自主学习噪声协方差的扩展卡尔曼滤波器,结果表明,它可以自动且快速地

输出噪声协方差,提高了导航精度。文献[32]提出了基于多无人机协同的自适应UKF来实现数据融合,得到最优位置。自适应UKF由2个平行的UKF滤波器组成,通过主滤波器和从滤波器分别对无人机的状态和噪声协方差进行估计,可以对估计误差进行补偿,使自适应UKF能获得比传统UKF更好的鲁棒性和准确性。

由于粒子滤波适用于任何动状态的空间模型,它能够近似测量完整的非高斯概率分布^[7]。并且多元积分通过蒙特卡洛采样近似,在协同导航领域同样受到关注,能够精确表达基于观测量和控制量的后延概率分布。文献[33]利用一个基于粒子滤波的协同目标跟踪器对目标进行位置和速度的估计,将编队内所有机器人基于视觉的目标观测测量通过无线通信系统传输到实时数据库,再通过粒子滤波去除观测噪声,从而准确地获得位置速度信息。

在无人机的协同导航中,信息滤波同样获得了研究者的关注,它可完成更简单的估计更新,更容易解耦和分散^[2]。文献[34]验证了一种在协同导航系统中无漂移导航姿态估计的充分条件,但是这个系统需要用一个集中的估计函数来估计所有无人机状态。所以提出了一种基于分散和分布的信息滤波器,将多无人机信标间的位置关系和本地惯导数据融合,得到一个相对精确的位置参数。文献[35]提出了改进范围参数化平方根容积信息滤波算法,通过结合完全分布式融合估计结构,集成平方根容积卡尔曼滤波器、范围参数化方法以及信息滤波器,可以实现多无人机协同无源定位的稳定性、实时性、准确性。滤波融合算法多种多样,在基础算法中衍生出新的算法,但不存在完美的融合滤波方案,在计算量、误差累积以及噪声观测的准确性等方面都难以同时达到最优,存在很大的优化空间,仍具有极大的研究价值。

4 多无人机协同导航故障诊断与容错方法

多无人机的编队故障诊断与容错是多无人机协同导航的重要一环,多无人机的编队在执行任务的过程中,可能会由于环境因素或者硬件损坏而导致系统故障,有些故障对于无人机的自主飞行是致命的,因此通过协同导航技术利用多平台传感器的多源异类导航信息对故障进行甄别与隔离。研究者对无人机的各种故障模型都进行了深入的研究,提出了诸多解决方案。

文献[36]主要考虑了在不确定环境下无机器人组成的编队目标搜寻的数据传输延时问题,它通过一个随机方法估计所有飞机采取不同行为的可能性,每架无人机将会对目标方程进行调整,估计其他无人机的行为,从而对搜索目标进行新的决策。避免了由于信息延时导致的搜索区域重叠,从而提高了编队的工作效率。当编队中的无人机发生硬件故障时,文献[37]提出了基于硬件冗余系统的故障诊断识别方法,该方法主要针对机器人编队,不需要借助故障模型和动态模型,而是由每个编队里的机器人通过对航位推算和激光扫描匹配来检测所得到的速度,再进行比较来检测机器人内部传感器状态。通过领队机器人和自身的激光测距传感器估计位置信息对故障元件进行识别。充分利用了多机器人多传感器的特点,减少了故障识别的复杂程度,保证了编队的稳定性。与此类似,文献[38]设计了多机故障检测、识别、恢复系统。这个系统利用了各个无人机搭载的传感器数据来检测它们的位置,判断姿态是否发生了错误,然后识别故障根源。该系统可以组建一个协同虚拟传感器,为故障的无人机提供冗余位置速度估计,也可以代替该故障无人机的内部传感器,形成一套更为完整的无人机故障检测和容错理论。对于容错方案,文献[35]则是选择了一个更加直接的方式来对故障无人机的位置进行确定,它是通过多无人机传感器之间的数据交流来对多无人机协同导航中的故障进行补偿。以GPS失效为例,当其中一架无人机GPS失效后,将3架其他的无人机作为参考点,通过故障无人机与其他3架无人机在惯性坐标系中的相对距离,可以确定故障无人机在二维水平面上的位置,间接地得到了故障无人机的位置。

多无人机利用协同导航信息对无人机编队进行多尺度冗余量测信息的故障检测与容错,可以为多无人机稳定安全飞行提供可靠保障,极大地提高了无人机的存活率,增加了多无人机在复杂环境下的适应性。

5 多无人机协同导航的发展趋势

随着无人机的普及,多无人机协同导航技术也受到了广泛的关注,从国内外学者的大量研究成果中归纳出以下五点发展趋势。

1)协同导航精度不断提高。无人机协同导航的研究已经进行多年,以视觉导航为主的协同导航

技术已经有了初步的进展,关于多无人机协同导航如何建模的问题也有了不小的研究,而关于误差的特性分析以及如何对误差进行补偿等如何提升精度的问题还没有多少进展。Fosbury A^[20]、Park J S^[22]针对视觉导航中的误差补偿给出了一些改进方法,但仍有待进一步的研究。

2)新型相对导航传感器的应用。除了已经介绍的视觉导航和无线电相对导航方式,诸如激光雷达、超宽频无线电传感器等相对导航传感器,虽然还未广泛应用于多无人机协同导航领域,但是在AUV协同导航,以及航天器协同导航等领域都有重要的应用。虽然针对的对象不同,但是在原理上都存在相似之处,因此,拓展全新的相对导航传感器也是未来研究的一个发展方向。

3)由单一传感器到多源传感器的融合。单一的相对导航方式其导航的精度以及可靠性有限,而在无人机协同导航中,每个无人机可以根据不同的任务需求配置不同的传感器设备,不仅可以提升无人机的有效负载,还能够利用不同相对导航方式的优势进行互补,多信息融合将是今后多无人机协同导航的研究热点。

4)故障诊断与容错的智能化。未来的无人机编队将会实现自主的故障诊断,综合多种传感器的信息,实现故障的自主诊断、识别和容错,不断提高系统的可靠性与稳定性。

5)由少量无人机到大型无人机机群。近年来多无人机协同导航的研究内容主要针对2~4架无人机组成的无人机编队,未来编队中无人机的数量势必远超这个数目,以实现更加复杂的目标任务。因此,如何协调好多无人机之间的信息交流与融合,在更多无人机的编队中也能保证良好的导航性能,必将成为今后研究的方向。

6 结论

协同导航技术在众多领域获得了广泛的研究,基于多无人机的协同导航技术极大地扩大了无人机的应用范围,在多无人机编队飞行中通过信息的共享融合,可以进行相对定位,提高导航精度。在少量无人机传感器故障时能够保持多无人机进行准确的导航。本文结合相关文献分析了多无人机系统下的协同导航的概念及意义,相对导航方式的研究现状以及多无人机信息融合及容错的方式方法。根据现有的发展状况,预测今后多无人机的发

展趋势。随着科学技术的迅速发展,多无人机协同导航技术的日趋成熟,可以克服当下存在的一系列问题,并充分发挥无人机的优势,具有极其重要的理论意义和工程价值。

参考文献

- [1] 徐博,白金磊,郝燕玲,等.多AUV协同导航问题的研究现状与进展[J].自动化学报,2015,41(3):445-461.
- [2] Wilson D B, Goktogan A H, Sukkarieh S. A vision based relative navigation framework for formation flight [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2014:4988-4995.
- [3] Ledé J C, Collaborative Operations in Denied Environment (CODE)[DB/OL]. 2015. <http://www.darpa.mil/program/collaborative-operations-in-denied-environment>.
- [4] Fernández J C, Martínez-De-Dios J R, Maza I, et al. Ten years of cooperation between mobile robots and sensor networks [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12(6):70.
- [5] 陈海,何开锋,钱炜祺.多无人机协同覆盖路径规划[J].航空学报,2016,37(3):928-935.
- [6] 白瑞光,孙鑫,陈秋双,等.基于 Gauss 伪谱法的多 UAV 协同航迹规划[J].宇航学报,2014,35(9):1022-1029.
- [7] Zhang Y, Mehrjerdi H. A survey on multiple unmanned vehicles formation control and coordination: Normal and fault situations [C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems. IEEE, 2013:1087-1096.
- [8] Hedgecock W, Maroti M, Sallai J, et al. High-accuracy differential tracking of low-cost GPS receivers [C]//Proceeding of the International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. ACM, 2013:221-234.
- [9] Gross J N, Gu Y, Rhudy M B. Robust UAV relative navigation with DGPS, INS, and peer-to-peer radio ranging [J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2015, 12(3):935-944.
- [10] Strader J, Gu Y, Gross J N, et al. Cooperative relative localization for moving UAVs with single link range measurements [C]//2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). IEEE, 2016:336-343.
- [11] Tseng P H, Ding Z, Feng K T. Cooperative self-navigation in a mixed LOS and NLOS environment [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(2):350-363.
- [12] Quist E B, Beard R W. Radarodometry on fixed-wing small unmanned aircraft [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2016, 52(1):396-410.
- [13] Hardy J, Strader J, Gross J N, et al. Unmanned aerial vehicle relative navigation in GPS denied environments [C]//Proceedings of the IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). IEEE, 2016:344-362.
- [14] Leishman R C, McLain T W, Beard R W. Relative navigation approach for vision-based aerial GPS-denied navigation [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74(1):1-15.
- [15] Leishman R, Macdonald J, McLain T, et al. Relative navigation and control of a hexacopter [C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2012:4937-4942.
- [16] Leishman R C, McLain T W. Multiplicative extended kalman filter for relative rotorcraft navigation [J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2014, 12(12):728-744.
- [17] Khansari-Zadeh S M, Saghaei F. Vision-based navigation in autonomous close proximity operations using neural networks [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(2):864-883.
- [18] Meng D, Li W, Wang B. Vision-based estimation of relative pose in autonomous aerial refueling [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(6):807-815.
- [19] Oh S M, Johnson E. Relative motion estimation for vision-based formation flight using unscented Kalman filter [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2007:6866.
- [20] Fosbury A, Crassidis J. Relative navigation of air vehicles [J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2008, 31(4):824-834.
- [21] 崔乃刚,王小刚,郭继峰.基于 Sigma-point 卡尔曼滤波的 INS/Vision 相对导航方法研究[J].宇航学报,2009,30(6):2220-2225.
- [22] Park J S, Lee D, Jeon B, et al. Robust vision-based pose estimation for relative navigation of unmanned aerial vehicles [C]//International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2013:386-390.
- [23] Roumeliotis S I, Bekey G A. Distributed multi-robot localization [C]//Proceedings of the 2002 IEEE Transactions on Robotics and Automation. IEEE, Manitoba, 2002:781-795.

- [24] 陶通, 黄亚楼, 苑晶, 等. 基于协助校正方法的多机器人主动同时定位与建图[J]. 模式识别与人工智能, 2012, 25(3):534-543.
- [25] Tomic S, Beko M, Rui D, et al. Distributed algorithm for target localization in wireless sensor networks using RSS and AoA measurements [J]. *Pervasive & Mobile Computing*, 2017, 37:63-77.
- [26] Guerrero J A, Fantoni I, Salazar S, et al. Flight formation of multiple mini rotorcraft via coordination control [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2010:620-625.
- [27] Shames I, Fidan B, Anderson B D O, et al. Cooperative self-localization of mobile agents [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2011, 47(3):1926-1947.
- [28] Indelman V, Gurfil P, Rivlin E, et al. Distributed vision-aided cooperative localization and navigation based on three-view geometry [C]//IEEE Aerospace Conference on Computer Society. IEEE, 2011:1-20.
- [29] Du R, Liu J, Jiang Z, et al. Fast data fusion algorithm for building navigation base in formation flying [C]//International Conference on Automation and Computing. IEEE, 2013:609-631.
- [30] Sharma R, Taylor C. Cooperative navigation of MAVs in GPS denied areas [C]//IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. IEEE, 2008:481-486.
- [31] 杨少凡, 余华兵, 陈新华, 等. 基于扩展 Kalman 滤波的单领航者自主水下航行器协同导航判别式训练方法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11):2756-2761.
- [32] Li H, Luo J, Li L, et al. Coordinated control and localizing target system for multi-UAVs based on adaptive UKF [M]//Intelligent Computing and Information Science. Springer Berlin Heidelberg, 2011:249-258.
- [33] Lima P U, Ahmad A, Dias A, et al. Formation control driven by cooperative object tracking [J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2015, 63:68-79.
- [34] Hoffmann G, Waslander S, Tomlin C. Distributed cooperative search using information-theoretic costs for particle filters, with quadrotor applications [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2006:6576.
- [35] Qu Y, Zhang Y. Fault-tolerant localization for multi-UAV cooperative flight [C]//2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications(MESA). IEEE, 2010:131-136.
- [36] Hashimoto M, Ishii T, Takahashi K. Sensor fault detection and isolation for mobile robots in a multi-robot team [C]//IEEE 35th Annual Conference on Industrial Electronics, 2009. IECON'09. IEEE, 2009:2348-2353.
- [37] Zhou D, Zhang H, Pan Q, et al. An improved range parameterized square root cubature information filter algorithm for multi-UAV cooperative passive location [C]//IEEE International Conference on Information and Automation. IEEE, 2015:1079-1084.
- [38] Suarez A, Heredia G, Ollero A. Cooperative sensor fault recovery in multi-UAV systems [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2016:1188-1193.