

自动空中加油技术研究进展与关键问题

董新民, 徐跃鉴, 陈博
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:自动空中加油是空中加油的高级实现形式,其应用可极大拓展无人驾驶飞行器的效能,近几年正成为国外航空领域新兴的研究内容之一。在分析自动空中加油特点的基础上,对现有的两种空中加油方式作了比较。根据国外有关自动空中加油研究的最新进展,从传感器选择、加油状态下的控制器设计、仿真与测试3方面详细论述了其基本原理与技术问题,指出了在研究自动空中加油技术时,所需解决的传感器精度、会合对接策略、协同操作、命令与通信、导航算法等关键技术问题。最后针对其研究现状与现有技术能力,指明了近期可初步开发利用并有望实现的技术。

关键词:自动空中加油;视觉传感系统;跟踪控制;相对导航;仿真

中图分类号: V228.1⁺7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)06-0001-05

空中加油是指在飞行过程中一架飞机向另一架或多架飞机(或直升机)传输燃油的活动。空中加油自出现起,就以其在军事行动中的重要作用而日益受到各国的广泛重视。随着各种无人驾驶飞行器(UAVs)的广泛应用,近几年出现了自动空中加油^[1-2](Automated Aerial Refueling, AAR)的概念。自动空中加油主要是针对为UAV提供可靠的空中加油能力而言。现实中,对UAV越来越高的性能要求及任务完成能力的需求和其自身载重小及油量少的特点逐渐成为一对难以兼顾的矛盾,为解决这种矛盾,少数航空发达国家开始研究自动空中加油相关技术,并取得了一些成果^[2-5]。

1 自动空中加油主要特点及比较

自动空中加油是指在人的指令、监控和(或)操作下,实现有人或无人驾驶飞机的加油功能的自动化。与传统有人驾驶飞机的空中加油不同,在自动空中加油(AAR)过程中受油机(UAV)没有驾驶员的直接操纵,因此受油机与加油机的会合、靠近、对接、保持编队位置、脱离等各个环节与机动飞行,需要受油机(UAV)在有限的自主权限下自动执行。UAV在接收到操作员的高级指令后处理传感器信息,生成相应的低级轨迹控制指令用于自身的导引、导航与控制系统,以达到操作者的控制目标。

目前有飞行硬管式(探针式)和插头-锥套式两种空中加油方式。对于硬管式加油来说,实现自动空中加油的情形与自主式编队飞行类似,只需UAV拥有与加油机保持相对位置的能力即可,硬管的对接可由加油机上的加油操作员操纵实现。而对于插头-锥套式加油方式,UAV要负责整个加油过程中自身的飞行与控制,根据获得的信息做出判断与决策,生成相应的机动指令,再将指令分解成一定的可执行指令,控制UAV严格按照建立的可行航迹飞行,最后UAV必须将受油插头插入锥套中才能实现加油。因此UAV不仅要拥有编队飞行的能力,而且需自主寻找加油锥套,不断实时获知锥套的位置及姿势,并向其不断靠近,确保对接成功,这无疑是一件对UAV要求很高的工作。因此两种加油方式不同的特点与难度决定了各自在实现自动化时需解决不同的问题,也造成了这样一种现状,即有关自动空中加油的概念实现及工程应用研究主要集

* 收稿日期:2008-03-12

基金项目:国防预研基金资助项目(9140A09050808JB3019)

作者简介:董新民(1963-),男,山东临沂人,教授,博士生导师,主要从事飞行器控制理论与应用、飞行控制系统维修理论与技术研究。E-mail: xuyuejian_123@163.com

于硬管式加油方式,而对插头-锥套式自动空中加油的研究则大多停留在理论与仿真研究阶段。

2 自动空中加油技术的研究进展

2.1 用于 AAR 的传感器

为实现空中加油的自动化操作,需要有远距离和近距离的测量设备,尤其是需要开发出一种高精度的测量装置,能够对末端对接阶段及加油过程中的加油机与 UAV 的相对距离和姿态进行精确测量,因为此时 AAR 飞行控制系统必须以足够精度获取两者相对位置与姿态信号作为控制输入。目前,可用于自动空中加油相对导航的手段与方法主要有:GPS 导航、被动视觉传感器、主动视觉传感器、使用估计(预测)方法的传感器组合。上述导航方法并不是任何情况下都适用,它们各有其优缺点。

差分 GPS(DGPS)作为一种已有技术,精度较高,能够满足多种相对导航应用的需求。自动空中加油要求插头与锥套之间的相对位置预测精度需要达到 10 cm 级,利用载波相位差分 GPS 可以达到该精度要求。但是只有通过安装在加油锥套上直接安装接收装置才能在终端近进与对接阶段准确捕获锥套运动状态,而这会引起很多综合与安全问题(如费用、飞行测试、效能等)^[6]。另外,加油机的机翼、尾翼会妨碍 GPS 卫星信号的接收,而且目前绝大多数接收机刷新频率仅有 1 Hz,同时还有多路径影响、卫星信号丢失等缺点。因此 DGPS 只适合在远距离范围内工作。

对于视觉传感系统,绝大多数都是通过一个或多个摄像机获得的二维图像来工作的。这里要对主动与被动视觉系统进行区分:被动系统不需要目标的任何合作,但是难点在于如何从图像中区分出基准点,而且在不同光线条件下从背景噪声中提取识别标记需要大量计算;相反,主动视觉系统和目标之间某种方式的通信和协同工作可令目标识别过程变得比较简单。

Pollini 等人^[7-8]研究了一类被动视觉传感器系统,被测物体上有规则地安装有红外发光二极管(IRLEDs),传感器(相机)获得发光管的图像,处理后得到相对导航信号。通过在加油锥套上安装 LEDs,他们对插头-锥套式自动加油进行了研究。不过文中未提及计算数值的更新速度,而这对扰动状态下的加油至关重要,因为太慢的更新速率显然不具备实用的可能性。另外,许多小型 UAV 无法满足图像处理硬件的重量与能耗需求。因此上述方法暂时只停留在仿真验证阶段。

1997 年, Texas A&M 大学的视觉导航实验室开始研究开发高精度的基于视觉图像传感器的相对导航系统,称为“VisNav”^[9-11]。VisNav 是一种主动视觉传感器系统,具有高精度数据测量生成能力,在 30 m 距离时精度在 3 cm 或 0.25°左右,数据更新速率是 DGPS 的 10 倍(高达 100 Hz),这为 AAR 系统的实现提供了可能。VisNav 不需要具有很强计算能力的图像处理系统,通过将光学传感器与主动光源或信号灯结合,可实时生成 6 自由度相对导航信息。当然,主动视觉传感器也有其缺点,就是需要特定的硬件配置和标记,无线电信号易被截获或受到干扰,而 Pollini 等人研究的视觉传感器系统则是一种完全被动的自主定位系统,不需要特殊的硬件配置和标记组合。

基于 GPS 可在远距离工作而视觉传感器可在近距离起作用,可考虑将 GPS 与基于视觉图像的传感器相结合^[6,9-10,12-13],采用绝对导航与相对导航切换方式实现自动加油。UAV 距离加油机较远时通过差分 GPS 获知自身与加油机的相对位置。在 UAV 上的摄像机捕捉到锥套前,GPS 信号作为编队控制器的输入;当锥套进入摄像机捕捉范围时,视觉系统生成有效的相对位置预测,此时 UAV 利用该位置预测进行反馈控制。

2.2 AAR 的控制

实现 AAR 的一个前提是需设计出可精确控制飞机姿态与轨迹的控制律,同时根据要求将不同传感器系统进行有效组合,采取一定的融合算法,在不同的飞行阶段采用不同的导航与控制方式。对于受油机来讲,设计的控制器可以同时满足硬管式与插头-锥套式加油方式的要求。

Valasek 和 Kimmitt 等人^[9]开发了 VisNav 传感器系统,他们设计了非零点集(Nonzero Set Point - NZSP)控制结构用于自动空中加油。NZSP 是一种全状态反馈的最优时域跟踪控制结构,与基于视觉图像传感器的相对位置导航系统相连,保证飞机的跟踪特性。后来通过加入时变卡尔曼滤波器^[10](Variational Kalman Filter - VKF),以提供对 VisNav 无法测量的其它控制变量的状态估计。不足是文中仅仅考虑了静态锥套情形,并未对存在扰动时的对接进行进一步研究,而这对实际应用更具有意义。

之后,Kimmitt 等人^[11]又设计出一种模型跟随控制结构——指令生成与跟踪(Command Generator Tracker - CGT)控制器对锥套位置非稳定的情形进行了研究。CGT 与 NZSP 不同的是,NZSP 仅能跟踪常值,而

CGT 可以跟踪由预先设定的模型生成的时变参考轨迹。结果表明如果在静止大气中,控制器能够引导受油插头实现与锥套的成功对接;但在存在扰动时会大大降低成功率。

虽然文献[9-11]肯定了 CGT 之类模型跟随控制器用于自动加油的可行性,但其主要缺点是必须事先知道锥套的轨迹,事实上参考状态或指令轨迹需要通过飞机状态及对锥套位置和姿态预测进行及时估计。基于此,Tandale 等人对 NZSP 控制结构进行了修改,设计了基于参考观测器的跟踪控制器(ROTC),该控制器不需要知道锥套的模型或其位置的先验知识。将 ROTC 整合到 VisNav 传感器系统中,从而解决了上述问题。对观测器与控制器组合的频率域稳定性分析显示出系统对传感器噪声、大气扰动等具有鲁棒性。

Fravolini 等人^[14-15]设计了跟踪参考信号的鲁棒控制器,给出了一种用于插头-锥管式自动加油组合控制方案。方案采用基于 GPS 信号与人工视觉传感器的模糊传感器融合策略产生相对位置反馈信号。通过非线性仿真验证了系统跟踪性能,但经过降阶处理后仍高达 24 阶的多变量鲁棒控制器在实际中难以实现。

此外,也有学者应用微分策略与自适应控制方法^[16]完成了自主式空中加油自动驾驶仪的设计。但是该方法不仅事先假设锥套位置已得到精确测量,而且没有考虑尾流、紊流的影响。

由此可看出,近距离的精确控制能力是实现 AAR 的关键之一,高增益飞行控制律设计的好坏将直接决定 ARR 能否成功实现。同时,如何将传统加油过程中的人工判断与操纵控制转变成 UAV 可自主决策并执行的符合特定要求的行为,也是值得深入研究的问题。

2.3 AAR 的建模、仿真与测试

任何新的技术概念在转变成实际系统前,都需要进行充分的研究测试。对于自动空中加油,首先须经过实验室测试来验证其基本原理及功能性,再通过飞行仿真评估验证这些技术概念,然后在实际飞行测试中进行功能及性能评价,最后才能将其应用到现有系统中。下面主要从建模、仿真、测试几方面对 AAR 的研究现状进行论述。

美国的几个研究机构在 AAR 的建模、仿真及测试方面做的工作比较系统,技术也比较领先。在建模与仿真方面,ARFL/HECI 的 UCAV-OVI(Operator/Vehicle Interface)开发出了一种用于控制多架无人驾驶飞机飞行过程中的空中加油的控制站交互接口^[17]。美国航空飞行器技术评估与仿真实验室(AVTAS)建立了自动空中加油实时仿真环境,可为发展与评估 AAR 技术和概念的应用提供必要的工具平台。在 AVTAS 进行的仿真主要支持及验证以下技术目标:识别、开发并论证完成 AAR 所必需的传感器能力;为无人驾驶战斗机开发半自动化的 AAR 技术及实施方案。

此外,Pollini 等人^[8]也建立了 UAV 的插头-锥套式空中加油仿真虚拟平台。该平台包含加油机与 UAV 动力学模型、两者之间空气动力学影响的建模、利用有限元技术建立的加油软管模型、生成仿真视觉的模块。略显不足的是该仿真平台仅能作为演示验证。Valasek 等人开发的称为“VisNav”的视觉传感器系统,虽然其性能不断提高,但是该系统目前仍停留在实验室的车载地面测试阶段,并未进行过飞行验证。

其它相关文献研究插头-锥套式自动加油的稍多些,但基本都停留在仿真与验证阶段。而在自动空中加油飞行测试方面做出工作的则更少,仅有美国 NASA 与 AFIT 进行了相关测试。

NASA Dryden 飞行研究中心 04 年完成了一项飞行研究计划,旨在建立插头-锥套式空中加油系统的动态模型,以支持自动空中加油系统的开发。飞行测试得到的动力学模型包含作用于系统的多种影响因素,如飞行条件、插头软管类型、加油机类型和重量、以及机动动作等。

美国 AFIT 的 Ross 等人^[18]在 No Gyro Test Management Project(TMP)中,研究了空中加油自动编队飞行控制,并进行了飞行验证,证明了编队飞行的安全性、稳定性,为实现硬管式自动空中加油奠定了基础。

以上从传感器、控制、建模与仿真等方面对 AAR 进行了阐述,就目前的技术实力和研究内容来说,要真正实现自动空中加油能力还有很长的路要走,但是自动加油无疑正成为未来空中加油的发展方向。

3 关键技术问题展望

空中加油在国外已有八十多年的历史,无论是插头-锥套式还是飞行硬管式加油的技术和设备都已相对比较成熟,但由于空中加油本身的难度及危险性较大,自动空中加油中的受油客体又主要以 UAV 为主,因此在自动空中加油技术实现工程应用之前,仍有一些关键问题需要解决。

3.1 近距离观察定位的能力

在自动加油状态下,必须具备足够精度的传感器装置测量加油机与受油机的相对距离和姿态。UAV 只

有在获得它与加油机间的相对位置——而且是高精度水平下的相对位置与姿态后,才能做出适当的判断与决策,获得可行的指令并执行正确的控制动作,因此具备能够在足够带宽下以高精度可靠工作的传感器是实现自动空中加油的关键。事实上,会合对接、尤其是存在大气扰动时具备的快速控制修正,需要目前传感器技术达不到的导航信息更新速率,基于传感器/GPS的相对导航设计有望成为AAR的远期解决方案。

3.2 协同操作

未来UAV的使用必将朝着集群化发展,各UAV之间、UAV与有人驾驶飞机之间按何种策略方式进行配合与协同,如何避免UAV与加油机或同一空域中的其他飞机发生相撞等都是实现自动空中加油必需解决的问题。更进一步,如何实现全空域防撞也是个需要解决的技术难题。

3.3 命令与通信

虽然UAV可以在一定的自主程度下执行某些飞行动作,但是操作员对UAV的操纵指令应该最优先得到执行,这一点必须得到保证。这样UAV才能在出现不安全的加油状况时迅速响应加油员的分离或其它操纵指令。因此,UAV与加油机、地面控制站间相应的通信数据链必须要有较短的响应时间,以及时提供相互通信。同时,数据容错率和数据缺失等问题必须得到有效解决。

3.4 导航算法

如何令UAV成功与加油机实施会合、截获追踪加油机并为之保持编队,进入加油阶段直至退出加油状态等,需要一整套的导航算法作保证,包括远距离条件下的会合截获算法、近距离条件下的追踪算法、编队控制律的设计等。各阶段算法之间通过怎样的策略实现平滑转换,必要时须进行控制模态的转换,导航算法与控制结构的结合等等,这些都是必须解决的问题。

3.5 现实约束

在UAV上实现AAR能力,需对加油机与UAV做出修改。要从花费、维护及可行性观点考虑,尽量减少对加油机的修改,UAV上的加油硬件亦须尽量减小尺寸与重量。同时UAV加油系统的功能要能够适应全天候情况。另外,其它要解决的技术难题有:冗余技术、意外事故处理、UAV与操作者间的视觉通信等。

上述技术问题不可能在短期内全部得到解决,但近期可初步研究开发并利用的技术内容有:

1) 为飞行控制律提供精确位置及距离测量的GPS定位仪,设计用于会合对接加油过程的一套GPS技术方案(如基于传感器/GPS组合的技术解决方案)。

2) 加油机动中近进阶段提供相对位置与姿态测量的相对导航系统。

3) UAV、加油机、UAV地面控制站间进行通信的技术数据链。

4) 令UAV安全自主实现机动靠近与对接的控制策略。

5) 将UAV定位并保持在加油位置的新的飞行控制律。

6) 一系列旨在使UAV与其它有人或无人驾驶飞行器间进行安全操作及加油的技术概念。

4 结束语

自动空中加油的相关研究目前还处于初级阶段,但是其实现必将带来相当显著的军事、经济效益。自动空中加油可极大拓展UAVs的使用效能,如增加航程、延长续航时间等。对有人驾驶飞机而言,自动空中加油技术可提供很好的辅助作用,如降低操作者的工作负担、提高加油效率,在不利天气条件下实施加油等。国外对自动空中加油的研究也表明其正成为航空领域的重要研究内容和空中加油的未来发展方向,国内有必要开展对自动空中加油相关概念及技术的探索性研究。本文正是针对自动空中加油在未来军事、民用等领域的重要作用,在总结自动空中加油特点的基础上,论述了国外这方面的最新研究进展与发展动态,阐明了在该领域需解决的一些关键技术问题。

参考文献:

- [1] Automated Aerial Refuel(AAR) Technologies and Challenges[R]. AFRL-VA-WP-TP-2004-314.
- [2] Smith Richard K. Seventy-five Years of In-flight Refueling Highlights(1923-1998)[M]. Lockland: Air Force History and Museums Program, 1998.
- [3] Nalepka Joseph P, Hinchman Jacob L. Automated Aerial Refueling: Extending the Effectiveness of Unmanned Air Vehicles [R]. AIAA-2005-6005.

- [4] Jacob Hinchman. Automated Aerial Refueling Research Summary Presentation[R]. AFRL - VA - WP - TP - 2003 - 344.
- [5] Hansen Jennifer L. The NASA Dryden AAR Project: A Flight Test Approach to An Aerial Refueling System[R]. AIAA - 2004 - 4939.
- [6] Hansen J L, Murray J E, Campos N V. The NASA Dryden AAR Project: A Flight test Approach To An Aerial Refueling System [R]. AIAA - 2004 - 4939.
- [7] Lorenzo Pollini, Mario Innocenti, Roberto Matr. Vision Algorithms for Formation Flight and Aerial Refueling with Optimal Marker Labeling[R]. AIAA - 2005 - 6010.
- [8] Lorenzo Pollini, Roberto Mati, Mario Innocenti, et al. A Synthetic Environment for Simulation of Vision - based Formation Flight[R]. AIAA - 2003 - 5376.
- [9] Valasek J, Kimmitt J, Hughes D, et al. Vision Based Sensor and Navigation System for Autonomous Aerial Refueling[R]. AIAA - 2002 - 3441.
- [10] Kimmitt J, Valased J, Junkins J. Autonomous Aerial Refueling Utilizing A Vision Based Navigation System. [R]. AIAA - 2002 - 4469.
- [11] Kimmitt J, Valasek J, Junkins J. Vision Based Controller for Autonomous Aerial Refueling[J]. IEEE on Control Applications, 2002; 1138 - 1143.
- [12] Campa G, Seanor B, Perhinschi M. Autonomous Aerial Refueling for UAVs Using A Combined GPS - Machine Vision Guidance [R]. AIAA - 2004 - 5350.
- [13] Awalt B, Turner D, Miller R, et al. Extended Kalman Filter Applications to Multi - vehicle UAV Cooperative Controls [R]. AIAA - 2003 - 6538.
- [14] Fravolini M L, Ficola Anfonio, Campa Giampiero, et al. Modeling and Control Issues for Autonomous Aerial Refueling for UAVs Using A Probe - drogue Refueling System[J]. Aerospace Science and Technology, 2004, 8: 611 - 618.
- [15] Campa Giampiero, Fravolini M L, Ficola A, et al. Autonomous Aerial Refueling for UAVs Using A Combined GPS - Machine Vision Guidance[R]. AIAA - 2004 - 5350.
- [16] Stepanyan V, Lavretsky E, Hovakimyan N. Aerial Refueling Autopilot Design Methodology: Application to F - 16 Aircraft Model [R]. AIAA - 2004 - 5321.
- [17] Williams Robert D, Gregory L, Feitshans. Allen Jrowe. A Prototype UAV Control Station Interface for Automated Aerial Refueling[R]. AIAA - 2005 - 6009.
- [18] Steven Ross M. Formation Flight Control for Aerial Refueling(AFIT/GE/ENY/06 - M35 [D]. Wright - Patterson AFB, OH; Air Force Institute of Technology (AFIT), 2006.

(编辑:姚树峰,徐敏)

Progress and Challenges in Automatic Aerial Refueling

DONG Xin - min, XU Yue - jian, CHEN Bo

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Automatic aerial refueling (AAR) is the advanced form of aerial refueling, its application can greatly extend the efficiency of unmanned aerial vehicles. And it has been a new research area of aeronautics in recent years. In this paper, a comprehensive review is made of state of art research in automated aerial refueling. By introducing the characteristic of AAR, the two existing methods of aerial refueling are compared with each other. The basic principles and technical approaches are discussed in detail. Three parts such as selection of sensor, controller design, simulation and testing, are particularly discussed to introduce the up to the minute investigation. Some important topics, including the sensor precision, maneuver rendezvous and docking strategy, cooperated operation, command and communication, and navigation algorithm are put forward as the fundamental problems and technical challenges in future aerial refueling research. Finally, the technologies which could be exploited primarily and come true in near future is pointed out.

Key Words: automatic aerial refueling; visual sensor system; tracking control; relative navigation; simulation