

无人机自主空中加油技术现状及发展趋势

钟德星*, 李永强, 李严授

西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049

摘 要: 无人机在现代战争中扮演着越来越重要的作用, 广泛运用于情报搜集、目标定位和精确打击等任务。但是由于其具有载重少和油量小的特点, 限制了自身的搭载能力和作战半径。自主空中加油技术的发展, 不仅能够有效地提高无人机装备的搭载水平和续航能力, 同时也能增强其在极端天气情况下的飞行能力。本文主要从无人机的发展、空中自主加油技术、国内外研究现状和未来发展方向等方面对自主空中加油技术的发展现状进行了综述, 并对现有的技术特点进行了分析和梳理, 对自主空中加油技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 无人机; 自主空中加油; 发展现状; 发展趋势

中图分类号: TP273+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2014) 05-0001-06

随着控制、通信、电子和微电子等技术的飞速发展, 无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)的发展已经取得了长足的进步。同时, 由于其自身具有体积小、重量轻、成本低、机动性好、便于隐藏、结构简单等优点^[1], 因此在资源勘探、重要目标定位、敌方位置记录、夺取战场电磁权、提供预警和通信中继、摧毁战略目标和非法地面系统等民用和军用领域都发挥着重要作用^[2,3]。但是由于其携带油量的限制, 严重制约了其起飞重量、续航能力和战略部署^[4]。为了有效克服这些困难, 提高无人机的作战效果和性能优势, 欧美等发达国家很早就开始着手研究无人机的空中加油技术。据美国诺斯罗普·格鲁门公司称, 空中加油技术可以使无人机的最大滞空时间由原来的最大50h延长至150h, 航程提高三倍左右, 同时作战半径也得到了成倍的提高。因此, 许多早期的航空专家和学者很早就提出了空中加油技术(Autonomous Aerial Refueling, AAR)的思想^[5]。该技术不仅能有效地改进无人机装备的搭载能力, 同时对于有人机在极端恶劣天气下的任务执行能力也有极大的帮助。现阶段世界上空中加油的主要方式有两种: 即称为硬管式的“伸索套管式”空中加油技术和称为软管式的“插头——锥管式”空中加油技术^[6]。两种技术都有自己的突出优点, 但是无论

哪种加油方式都对加/受油机的机组人员提出了很高的操作要求, 同时对人员的生理和心理素质也提出了苛刻的条件。针对无人机自主空中加油技术的研究正逐渐成为当下研究热点。

本文就无人机的发展历程, 现阶段的国内外的研究现状, 空中加油技术的飞行技术和两种加油技术的优缺点做出介绍和梳理。在文章的最后, 对未来无人机发展所需的技术做出了要求和评估, 并对无人机的发展方向做出了预测和展望。

1 发展历程

1.1 无人机的发展

迄今为止, 无人机已经经历了数次局部战争的实战考验, 卓有成效地完成了多种军事任务, 以其突出地战绩和卓越地性能赢得了各国军方和高层的广泛赞许。加之其具有造价低、生命力强、无惧伤亡等优点, 使得无人机的发展有了非常强劲的动力和广阔的发展前景。再者, 由于电子技术和航空科技的飞速发展, 使得无人机的发展实现了从发展师级战术无人机到发展中高空长航时无人机系统再到发展旅团级战术无人机系统的三次飞跃。

收稿日期: 2014-04-22; 录用日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61105021)

*通讯作者: Tel.: 18049546680 E-mail: bell@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: ZHONG Dexing, LI Yongqiang, LI Yanrui. State-of-the-art and tendency of autonomous aerial refueling technologies for unmanned aerial vehicles[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(05): 1-6. 钟德星, 李永强, 李严授. 无人机自主空中加油技术现状及趋势[J]. 航空科学技术, 2014, 25(05): 1-6.

1.2 空中加油技术的发展

空中加油技术最早出现在20世纪初,经过人类一百多年的不断探索和尝试,到目前为止,少数发达国家已经掌握了比较成熟的技术。回顾过往一百多年的发展历程,其发展历程大致可以分为三个阶段。

(1) 探索阶段(1909年—1947年)

由于空中加油技术可以有效提高飞机的载弹量和滞空时间,再者由于飞机发明之初就有人提出了空中加油的设想,并且得到了广泛认可,因此空中加油技术的发展在当时具有比较好的思想基础。第一次空中加油技术出现在20世纪20年代末,当时美国人利用两架DH—48的螺旋桨飞机悬挂一根15m的软管在空中完成了加油任务并引起了不小的轰动^[7]。之后的一段时间,冒险家们竞相比拼飞机的空中加油次数和滞空时间。比较有代表性的是1930年7月间,一架飞机依靠空中加油技术连续滞空27天,累计加油60余次并且无一例外次次成功。遗憾的是由于早期的飞机螺旋桨在机身前段,高速运转的螺旋桨有可能触碰到加油软管,再者螺旋桨飞机不同于后期的喷气式飞机耗油量巨大。出于上述的考虑,在此后漫长的20多年时间里,此项技术被长期搁置。

(2) 发展阶段(1948年—20世纪80年代)

二战之前,空中加油技术只出现于民用领域和少数冒险家的视野当中。二战中,受制于油量的限制,机群在导航、预警和编队等方面都存在着巨大的缺陷,有的战机甚至在弹药没有完全打完的情况下就不得不返航,这些都给军方造成了极大的资源浪费和人员伤亡,甚至能够左右战争的胜负。比较著名的案例有空袭东京。日本偷袭珍珠港之后,美军为了报复日本,对日本本土东京采取了类似自杀似的远程轰炸。其结果广为人知,由于缺乏足够的燃料支撑,美军16架B-25轰炸机中多数迫降中国江浙沿海,造成大量美军机组人员被日军俘虏和先进飞机被缴获的严重后果。显然,如果仅从战略的角度讲这次空袭是非常成功的;但是如果从战术的角度讲,由于多数轰炸机机毁人亡,伤亡惨重,所以这次空袭是极不成功的。试想,如果当初有空中加油技术提供足够燃料补充的话,没有被击落的美军飞行员、机组人员将多数得以幸存,当时最先进的飞机也可以得以保留并不被日军窃取先进技术。由于具有了强烈的需求牵引和技术推动,战后空中加油技术得到了突飞猛进的发展。二战后,美国保守势力敏锐地意识到战后世界格局就是美国和苏联的对峙,而空军力量的强弱将是决定对峙结果的重要砝码。1946年,美国战略空军(SAC)宣告成立,远程轰炸成为人们首要考虑的战略

问题。而飞机的有效航程和起飞重量成为了制约远程轰炸的最大难题。为了有效应对这个问题,美军率先开始大力发展空中加油技术。在这个阶段,飞机的空中加油技术得到了突飞猛进的发展,并在随后的多场局部战争中被广泛使用。例如,在整个越南战争中,KC-135加油机为多达195000次空中打击提供空中加油,加油次数达850000次,战争的高峰期共有195架空中加油机投入使用。

(3) 成熟阶段(20世纪80年代—现在)

经过三十多年的发展,20世纪80年代中期,空中加油技术已经比较成熟。在此后的数次局部战争中,空中加油技术得到了实战检验。在1982年4月的英国和阿根廷的马岛战争中,英国大量使用了空中加油机作战。此次战争规模虽然不大,但对英国及世界空军而言是一次极好展示局部战争快速反应能力重要作用的机会。各国专家对英国在马岛战争遭偷袭极端被动情况下,快速寻找对策,快速做出反应给予高度评价,同时这也被认为是英国由被动转为主动的关键。而其中空中加油技术的使用对英军战斗机的远距离奔袭起到了至关重要的作用,并在战后总结中被高度赞扬。空中加油技术不仅被广泛使用,加油规模也从之前的单机加油模式发展到多达30~50架次的机组加油模式。1991年1月17日,美军B-52机群从路易斯安那州起飞,经过空中加油飞抵伊拉克首都巴格达并用巡航导弹成功袭击了巴格达的固定目标,这次任务使用的正是机群间的加油模式。与此同时,无人机的使用频率也达到了空前的高度。在第一次海湾战争中,美军平均每天使用240架空中加油机为多大1000架飞机进行空中加油,而整个海湾战争的作战效果也是空中加油技术作用的最好验证。由于空中加油技术作用的逐渐体现,世界各国的专用空中加油机的数量也在不断增加,并且多数装备于欧美等航空发达国家。据统计,目前世界上3/4以上的空中加油机装备于美国等国家,并且美军的加油机部队可以与作战飞机在任何地点准确会合,并进行快速加油。

2 国内外研究现状

伴随着无人机技术和空中加油技术的飞速发展,自主空中加油技术的研发就显得更加紧迫。国内外的科研工作者也相继开展了无人机自主空中加油技术的研究。目前为止,已经取得了一定的研究成果。

空中加油技术主要分为软管式加油技术和硬管式空中加油技术^[8]。软管式空中加油设备亦称为软管-浮锚式(Probe & Drogue)加油系统,是英国航空公司在继承前人工作的基础上最早制造出来的。采用此种方式进行空中加油,只需要



图1 无人机空中加油

Fig.1 Autonomous aerial refueling of UAV

在机头或机翼前缘装一根固定的或可伸缩的受油管即可。而加油设备是由一条 22~30m 长的软管和一个漏斗式浮锚所组成的^[9]。浮锚上面装有机械自锁装置,呈漏斗状,重量比较轻。空中加油过程是:加油方操作人员将软管释放出并打开下面的信号灯,收到受油方信号后,便调整自己的受油管道使管道接通并锁闭,燃油便自动输送至受油机。由于要求加油中双方相对静止,所以对加油中双方的操作都有严格的要求。如果加油过程一切正常,则黄褐色的信号灯会自动熄灭,否则当出现紧急情况的时候红色的信号灯就会亮起。当加油过程结束后,加油方会把加油开关切断并把接口处的锁松开,然后受油方逐渐减速与加油方形成一定的速度差,当此速度差达到一定的值以后会导致加油管与受油方脱离,然后受油方逐渐减速驶离加油方。

伸缩管式空中加油设备也可称为硬管式加油设备^[10]。该设备是美国波音公司研制成功的,于1949年底投入使用。它是一根刚性的伸缩管,平时置于机体内部,当需要执行空中加油任务的时候伸出来。伸缩管的中间有一个130°的舵形面。加上伸缩管可以伸缩可以保证它在一定范围内活动。当执行空中加油任务时,受油机通过信号逐渐与加油机方靠近。在达到一定的距离后,加油机的操作员通过人工操作使双方加油管接通并将加油杆锁上。加油结束后,可由受油方减速,加油杆开锁两机分离。

美军空军实验室为其空中无人加油机设计了“三步走”的发展战略^[11],第一步是“有人驾驶加油机—无人机加油平台”的空中加油试飞;第二步是“有人驾驶飞机—变稳定性飞行模拟器”的空中加油试飞;第三步是“无人机—无人机”空中加油试飞,目前第一阶段的研究任务已经由美国的研究机构完成^[12],并将第二阶段的任务授权于美军空军实验室。2012年9月,美国国防部预研局(DARPA)完成了2架改进型 RQ-4“全球鹰”近距离的飞行测试任务。以验证该机型无人机

的空中自主加油技术。同时,在理论研究方面也取得了一定的进展,如英国Bristol大学的Thomas Richardson提出了用于增大算法可容许运动范围的组成图像校正反算法^[13];美国的Giampiero Campa博士提出了基于机器视觉的算法对加油机进行特征提取及特征配对等^[14]。

我国的无人机加油技术起步较晚,目前已经将软管作为主要的研究对象,并积极致力于无人机加油的飞行控制之中,目前已经取得了一定的成就。2008年5月,黑文静^[15]等人通过对硬式自主空中加油杆的建模与仿真,采用了输入—输出非线性反馈线性化方法将姿态控制方法解耦,从而实现对加油杆的控制。北京航空航天大学的解洪文等人针对自主加油中的近距离导航问题,研究了双目视觉的导航算法,并进行了三维实景仿真,能够精确测量加油杆的位置信息和姿态信息。另外,空军工程大学工程学院的陈博和北京航空大学的李大伟分别于2008年4月和2010年7月提出了各自的加油机尾部涡流场建模方法和仿真方案^[16],为我国未来无人机空中加油技术的发展奠定了良好的理论基础。

3 两种加油技术的优缺点

无人机自主空中加油技术的研发是基于有人机空中加油技术的,目前主要的两种加油技术分别为美国空军使用的“伸缩管式”(BRR,也称硬式加油)和美国海军和其他国家使用的“插头—锥管式”(PRD,也称软式加油)。

采用“插头—锥管式”加油设备的优点是:加油机上不需要有操作员,加油方式也更加简便^[17]。同时由于中间加油的管子是软管,可以克服加油过程中加、受油机之间飞行姿态的影响。但是,其缺点是对受油机的飞行控制要求较高,同时由于较慢的燃料传输速率导致了加油过程较长,对极端恶劣天气及大气的适应性也较差。

采用伸缩管式加油设备,具有输油速度快,每分钟可达到6000L左右,并且对空气湍流不太敏感(因为是刚性杆),对接操纵方便等优点。其缺点是一次只能给一架飞机加油,通用性差,并且需要专门的加油操作员。

4 空中加油飞行技术

由于空中加油阶段是2架飞机在高速运动间的相对运动,无论是对接阶段还是加油阶段都处于十分危险的状态,因此为了能够有效保障无人机加油阶段的安全,保证会合、对接、加油、分离过程的顺利进行,一套安全有效的飞行技术方案就是十分必要的。

4.1 会合阶段

接到加油命令后,在不同位置的两架无人机或其中一方前往指定的空域,若双方没有同时到达,则先行到达的一方在指定的空域盘旋,等待另一方的到达。当双方均到达指定空域后,经由双方或三方通信确定准备就绪后,则可以开始无人机的空中加油准备活动。

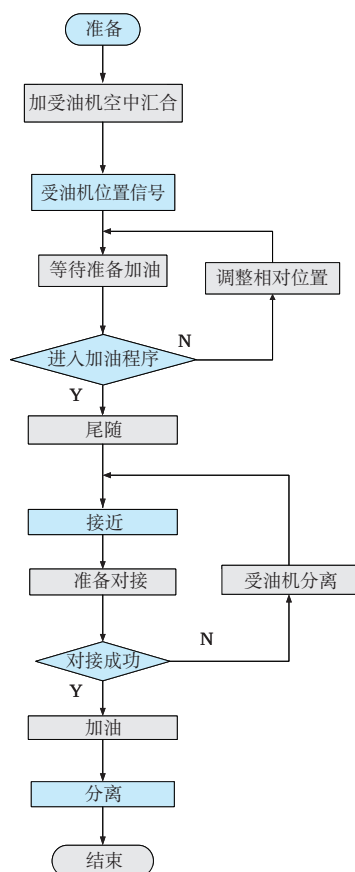


图2 无人机空中加油流程

Fig.2 Process of autonomous aerial refueling

4.2 对接阶段

对接是整个无人机空中加油技术的重点,也是需要解决的核心技术。由于在对接阶段双方既要受到空气涡流的影响,又要受到来自对方的影响甚至己方的气流影响,因此,对接技术难度极大。另外彼此的抖动也是影响对接的关键因素之一。现阶段科研工作者所做的大量科学研究也是基于此而进行的。具体的操作为:双方到达指定空域后,受油机飞至加油机上方300m处,然后双方飞至加油初始点处,受油机下降高度至加油机上方150m处,同时受油机减速至加油机后方1500m处,此时双方建立视觉联系。受油机进一步降低飞行高度至加油机下方300m处,然后逐渐靠近进行对接。

4.3 加油过程

对接成功后,开始加油,此时要求加/受油机保持相对平稳的状态飞行。为了有效的缩短加油过程,避免加油过程中可能出现的问题,要求提高单位时间的加油速率。现阶段的加油速率最快可以达到6000L/min左右,比较慢的也有1500L/min左右。

4.4 脱离阶段

当加油过程结束后,双方需要脱离。此时,受油机归入无人机编队准备执行下一个任务,加油机则准备为下一架无人机加油或者返航。

5 展望

虽然空中加油技术在我国起步较晚,但是国外一些发达国家在此项技术领域的研究已经有了一定的进展。对于无人机的空中加油技术,由于其具有较大的技术难度和危险性,因此还需要进一步的研究探索,同时在自主加油技术实现工程应用之前,仍有一些关键问题需要解决。

(1) 近距离观察定位的能力

在自动加油状态下,必须具备高精度的测量装置实时测量加油机与受油机之间的姿态信息与相对位置。无人机只有获得高精度的双方信息之后,才有可能做出适当的判断和决策,因此具备高精度和足够带宽的传感器就显得尤为重要。事实上,会合阶段对于存在的大气扰动现象能够及时修正的传感器目前还远达不到要求。而要想实现无人机的空中自主加油,此项技术难题就必须得以解决。希望后期的技术能够突破这一技术壁垒。

(2) 协同配合

据美国军方介绍,未来用于执行军事任务的无人机数量将大幅提高。预计到2025年,美军90%的战机将实现无人化。届时无人机之间的编队问题,协同配合问题等将显得异常突出。同时无人机在加油过程中如何协调单机与机群之间的有序配合,有效防止加油机与受油机的碰撞以及实现全空域防碰撞都是需要解决的问题。

(3) 通信问题

虽然在一定的条件下无人机可以自主飞行,本文所研究的空中加油过程也是在无人机完全自主的情况下实现加油。但是战场情况瞬息万变,极有可能出现突发情况。这就要求地面操作人员对无人机进行人工干预,此时操作人员对无人机的操作指令就必须优先送达优先执行,以确保无人机在突发情况下能够第一时间与受油机脱离,避免事故的发生。因此,要求无人机与操作员、地面通信站间的通信数据链响应时间较短。同时,要求数据通信系统要有较高的

鲁棒性和容错率。

(4) 导航算法

如何令无人机与加油机进行远距离会合,如何获取加油机位置信息并与之保持队形,如何进入加油状态并安全退出,如何驶离并进入无人机编队这些都需要有一套成熟的导航算法来实现。同时各阶段怎样实现平滑的过渡,怎样实现控制模态的转化等也是比较棘手的问题^[18]。虽然现阶段无人机导航算法已成为国内的研究热点,但还是没有一套完整系统高效的算法。

无人机空中加油技术的发展不仅能够有效提高无人机的作战效能,还能大幅改进有人机空中加油对接效率,是未来无人机发展的主要方向。本文主要就无人机的发展历程、空中加油现状及未来发展方向加以讨论,并对无人机加油的关键技术予以说明。伴随着空中加油技术第一阶段“有人驾驶加油机—无人机加油平台”的空中加油试飞成功和2012年极具挑战性的高空飞行条件下完全自主空中加油无人机的试验成功,无人机空中自主加油技术理论部分已经基本宣告成功^[19]。

AST

参考文献

- [1] 秦博,王蕾.无人机发展综述[J].飞航导弹,2002,12(8):4-10.
QIN Bo, WANG Lei. UAV Development Review[J]. Aerodynamic Missile, 2002, 12(8):4-10. (in Chinese)
- [2] 王龙,董新民,贾海燕.机器视觉辅助的无人机空中加油相对导航[J].应用科学学报,2012,30(2):209-214.
WANG Long, DONG Xinmin, JIA Haiyan. Machine Vision-Aided Relative Navigation for UAV Aerial Refueling[J]. JOURNAL OF APPLIED SCIENCES, 2012, 30(2): 209-214. (in Chinese)
- [3] 陈博,董新民,徐跃鉴,等.加油机尾流场建模及受油机飞行安全性分析[J].系统仿真学报,2008,20(8):1994-1997.
CHEN Bo, DONG Xinmin, XU Yuejian. Modeling of Tanker'S Wake Field and Flight Safety Analysis of Receiver Aircraft[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(8): 1994-1997. (in Chinese)
- [4] Li B, Mu C, Wu B. A survey of vision based autonomous aerial refueling for Unmanned Aerial Vehicles[C]. in Proceedings of IEEE Third International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2012: 1-6.
- [5] Ross S M, Pachter M, Jacques D R, et al. Autonomous aerial refueling based on the tanker reference frame[C]. in Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2006.
- [6] Gao S, Cheng Y, Song C. Drogue detection for vision-based autonomous aerial refueling via low rank and sparse decomposition with multiple features[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60: 266-274.
- [7] 穆志韬.飞机空中加油技术及发展趋势[J].江苏航空,1998(2):12.
MU Zhitao. Aircraft refueling technology and development trend[J]. Jiangsu Aviation, 1998(2): 12. (in Chinese)
- [8] 曲东才.空中加油机与空中加油技术[J].现代军事,1996(9):10.
QU Dongcai. Aerial refueling tanker and aerial refueling technology[J]. Modern military, 1996(9): 10. (in Chinese)
- [9] 王伟,刘喜藏,王鹏,等.空中加油软管—锥套动态建模与仿真[J].电子设计工程,2012,20(17):135-137.
WANG Wei, LIU Xicang, WANG Peng, LIU Xiao-qi. Dynamic modeling and simulation of aerial refueling hose-drogue[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(17): 135-137. (in Chinese)
- [10] 王力,孔媛媛,方冰,等.空中加油问题模型建立及其解法[J].数学的实践与认识,2006,36(7):101-112.
WANG Li, KONG YuanYuan, FANG Bing, et al. The Models of in-flight Fueling of the Fighter Problems and Their Solutions[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2006, 36(7): 101-112. (in Chinese)
- [11] 徐干,曹近齐.国外空中加油技术的现状及发展[J].航空科学技术,1995(1):011.
XU Gan, CAO Jinqi. Status and development of foreign air refueling technology[J]. Aviation Science and Technology, 1995(1): 011.
- [12] 蒋红岩,李文川,肖敏.无人机自主空中加油技术研究[J].航空科学技术,2011(1):35-38.
JIANG Hongyan, LI Wenchuan, XIAO Min. Research on UAV autonomous aerial refueling technology[J]. Aviation Science and Technology, 2011 (1): 35-38. (in Chinese)
- [13] Martinez C, Richardson T, Campoy P. Towards Autonomous Air-to-Air Refuelling for UAVs using visual information[C]. in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013: 5756-5762.
- [14] Campa G, Napolitano M R, Fravolini M L. Simulation environment for machine vision based aerial refueling for UAVs[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2009, 45(1): 138-151.

- [15] HEI Wenjing, AN Gang, LIN Hao, et al. Simulation Research on Nonlinear Decoupling Control for Boom[J], *Flight Dynamics*, 2008, 26(4): 27-30.
- [16] 刘翌, 袁锁中, 周春华. 软管式自主空中加油受油机控制系统研究[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(8): 1755-1761.
LIU Zhao, YUAN Suozhong, ZHOU Chunhua. Flight Control of Receiver Aircraft in Probe and Drogue Aerial Refueling[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(8): 1755-1761.
- [17] 胡琪. 无人机的未来发展之路[J]. *环球军事*, 2007, 12(5): 38-39.
HU Qi. Future development of UAVs[J]. *Global military*, 2007, 12 (5): 38-39. (in Chinese)
- [18] 董建明, 徐跃鉴, 陈博. 自主空中加油技术研究进展与关键问题[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2008, 6(6): 1-4
DONG Jianmin, XU Yuejian, CHEN Bo. Progress and challenges in Automatic aerial refueling[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2008, 6(6): 1-4. (in Chinese)
- [19] Nalepka J P, Hinchman J L. Automated aerial refueling: extending the effectiveness of unmanned air vehicles[C]. in *Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*. 2005: 15-18.

作者简介

钟德星 (1983—) 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 机器视觉与模式识别, 无线传感器网络。

Tel: 18049546680

E-mail: bell@xjtu.edu.cn

李永强 (1987—) 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器视觉。

Tel: 18702939540

李严樱 (1990—) 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器视觉。

Tel: 18192686992

State-of-the-art and Tendency of Autonomous Aerial Refueling Technologies for Unmanned Aerial Vehicles

ZHONG Dexing*, LI Yongqiang, LiYanrui

School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: The Unmanned Aerial Vehicles (UAV) plays a more important role in modern war, and they have been widely applied in the terms of intelligence collection, targeting and destroying key targets etc. Due to the limit of payload and fuel carried, their flying range and carrying capacity are limited correspondingly. The technique of Autonomous Aerial Refueling (AAR) for UAVs cannot only solve the above problems, but also can enhance the fight ability of man-driving aircraft in the extreme weather conditions. This paper describes the brief history of the development of UAV, the state-of-the-art and tendency of Autonomous Aerial Refueling for UAVs. The current technologies of AAR for UAV are also analyzed and classified. The development trend of autonomous aerial refueling technology are also prospected.

Key Words: UAV; autonomous aerial refueling; developing situation; developing tendency

Received: 2014-04-22; Accepted: 2014-05-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(61105021)

*Corresponding author. Tel. : 18049546680 E-mail: bell@mail.xjtu.edu.cn