



无人自主空中加油相对引导技术

航空工业成都飞机设计研究所 潘磊 孙绍山
歼击机综合仿真航空科技重点实验室 金奇 马波

当今航空领域，空中加油是提升飞行器平台能力的倍增器。在军事领域，空中加油可显著提高战斗机的续航与挂载能力；在民用领域，空中加油可显著增加飞行器经济性与安全性。现有的空中加油方式主要分为硬管式空中加油和软管式空中加油两种形式。这两者加油方式对飞行员的操纵技术和心理均提出了极高要求。例如软管式空中加油，由受油机飞行员通过手动操纵受油机，来完成受油机与加油机加油锥套之间精确对接与保持。而对硬管式加油而言，虽然受油机飞行员无需完成对加油锥管的对接机动，但由于受油机插口多位于驾驶舱后方，飞行员无法目视确认机身与硬管的相对关系，却需保持与加油机的相对关系，心理压力也极大。需要明确的是，软管式和硬管式无人自主空中加油其基本导航引导技术相同，区别仅在软管式无人自主空中加油需要额外识别加油锥套的位置，由受油机实现对接机动。

因此，为了减轻飞行员空中加油时的压力负荷，有必要以高安全和高可靠的方式实现飞行器空中加油任务的自主化和自动化，而高精度导航引导是实现自主空中加油最重要的关键技术之一。

2000年，NASA启动了自主编队飞行(AFF)计划，该计划的成功让美军方意识到无人自主空中加油的可行性。于是在2002年相继启动了包括UCAS-D, AARD(自主空中加油验证)等在内的多项自主空中加油相关项目。2004年前NASA德莱顿飞行研究中心完成以F/A-18为载机的视觉引导下伙伴加油对接，紧接着2006年完成了F/A-18与KC-707的软管式对接。2008年，诺格公司完成了“里尔喷气”与KC-135R的紧密编队，验证了GPS/INS捷连导航的可用性，并与2015年4月成功完成了X-47B无人机与KC-707的自主空中加油验证，标志着美军掌握了无人自主空中加油技术。

自主空中加油的基本定义

空中加油是指一架航空器(加油机)在空中给另一架或数架航空器(受油机)加注燃油的技术，而自主空中加油一般是指受油机自主完成空中加油任务，包括汇合、编队、对接、加油和退出等过程的技术。硬管式空中加油和软管式空中加油仅在对接过程中有所不同，加油机操纵手操纵受油机硬管完成对受油机的主动对接工作。本文将对自主空中加油导航引导过程的应用场景、特点及其各种约束条件进行阐述和分析。

自主空中加油导航引导技术

国内外针对自主空中加油导航引导技术各条技术路线展开了多种研究，如PSD导航引导技术，视觉导航引导技术，卫星导航引导技术，光场导航引导技术和激光导航引导技术等，下文将对重点技术发展现状展开简要介绍。

基于卫星的导航引导技术

基于卫星的导航引导技术主要采用载波相位差分技术，是指基于载波相位测量值的精密相对定位，它是差分定位的另一种形式。在精密相对定位系统中，加油机直接播发它的GNSS测量值，然后受油机将这些测量值与自身对卫星的测量值经差分运算组合起来，最后利用组合后的测量值求解出基线向量而完成相对定位。

这种观测具有很高的精度，可实时给出厘米级的定位结果。基于载波相位测量值的精密相对定位是GNSS定位中精度最高的一种定位方式。这种定位方式具有明显的距离优势，在远超视觉范围外即可开展相对定位，卫星相对定位支持受油机与加油锥套对接的导航引导需求，因此在AARD试验中同时使用了基于卫星和视觉的

相对定位技术，以完成自主空中加油试验，如图1所示。

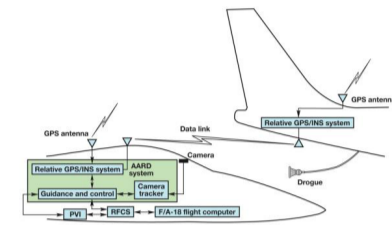


图1 卫星导航引导技术在AARD中应用

但是基于卫星的导航引导技术仍面临着精度与完好性问题。因此，包括美国空军实验室在内的国内外机构一直在寻找GPS不可用/拒止环境下的导航引导备选方案。

基于视觉的导航引导技术

近年来，随着计算机视觉理论的日益成熟及模式识别与图像处理技术的迅速发展，基于视觉的导航引导技术被广泛运用于航空、航天等工程应用中。它使用机载摄像机从拍摄的图像中提取有价值的信息，进行处理和识别并用于导航，具有信息量大、自主性强以及无源性的特点。国内外也开展了关于视觉的导航引导技术研究。如布里斯托大学的Martinez等人针对基于视觉的导航引导技术利用锥套本身的特征进行目标检测、目标视觉跟踪及三维位置视觉估计，并且在实验室条件下利用六自由度机械臂进行了基于视觉的导航引导仿真实验，如图2所示。实验表明，该视觉导航系统具有鲁棒性好、计算量小等优点。

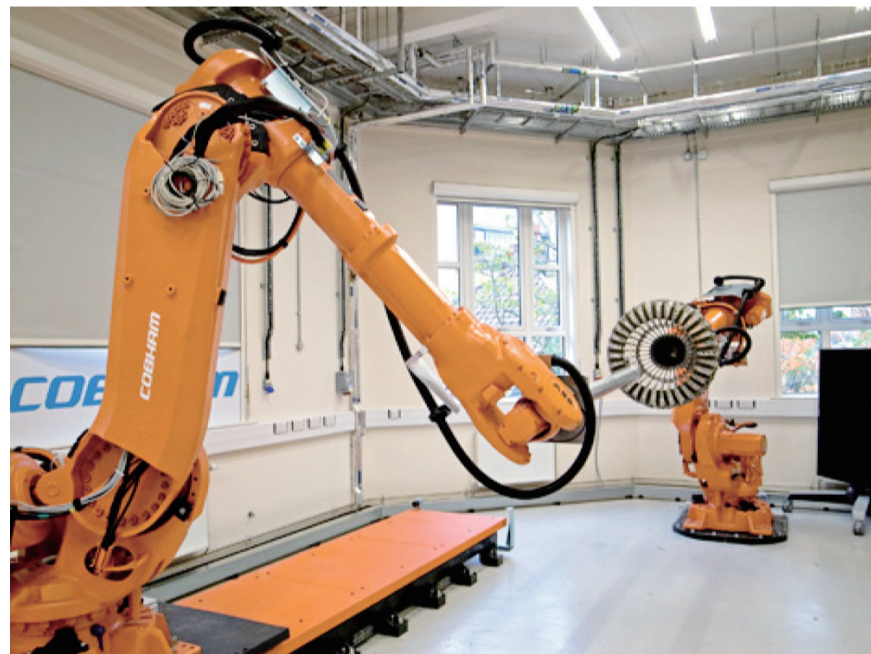


图2 视觉导航引导试验平台

从视觉的图像采集方法和处理手段区分，基于视觉的自主空中加油导航引导技术主要可分为单目视觉导航引导技术和双目视觉导航引导技术。

双目视觉导航引导技术。2005年DAPRA和NASA共同牵头发起了AARD验证关键技术。NASA德莱顿飞行研究中心的自主空中加油计划，采用了GPS和视觉相结合的技术在2005年完成了飞行验证。



图4 双目视觉导航引导飞行验证

双目视觉定位要求双目之间具有一定的基线，增强双目所采集的图像差距，提高测距精度。这就造成了当双目视觉导航引导传感器安装于飞行器表面上时对飞行器影响较单目视觉导航引导大。NASA将传感器分别安装于试验用F-18飞机翼尖挂架和翼下挂架之上，如图4中所示。且由于基线的存在，当飞行器受到气流影响或发生大负载下的机体弹性气动变形，可能会导致定位精度下降，需要额外补偿措施。

单目视觉导航引导技术。同时，针对双目视觉导航引导的不足，国内外也针对单目视觉导航引导技术也开展了应用研究和演示验证。在2008年，DAPRA选了一个商业单目摄像机安装于F-18机头右侧，靠近HUD处，该摄像机包含一个商用视频追踪单元(OCTEC, Ltd., Backnell, Berkshire, United Kingdom)。摄像头感知加油锥套位置并输出相对位置关系。相关信息在飞行员面前显示，如图3所示。

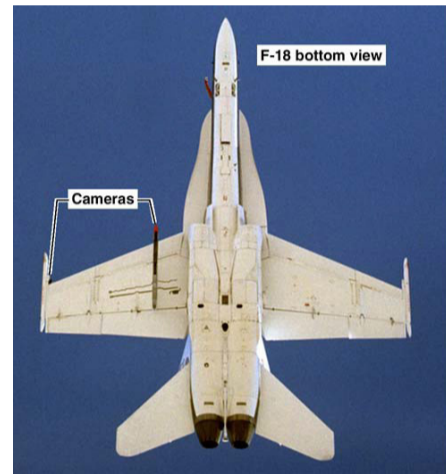


图3 双目视觉导航引导飞行验证

单目视觉导航引导技术主要是对图像进行本征检测、跟踪及三维估计。由于单目视觉导航引导需要时刻将实时图像与基准图像进行匹配，而实时图像和基准图像差异一般较大，故其精度较低，且严重依赖计算资源。

油导航引导上的应用展开了大量研究并取得积极成果。

知名度比较高的有德州农工大学的Valasek等人开发的视觉位置姿态感知(VisNav)系统，具有高精度数据测量生成能力。VisNav系统由位置敏感二极管(Position-Sensing Diode, PSD)，传感器盒及可调制的主动光源(红外LED)等硬件构成，如图5所示。VisNav系统应用过程中，PSD安装在受油机上，红外LED安装在锥套上，红外LED发

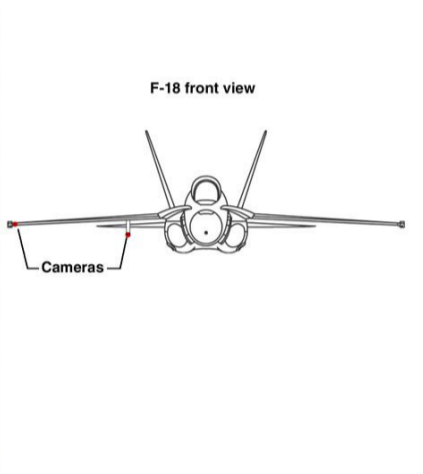


图5 基于PSD的导航引导技术原理示意图

射的结构光照射到PSD上时，会产生电流信号，根据电流强弱可以得到红外LED在PSD平面的投影坐标。当得到4个及4个以上红外LED的数据后，VisNav系统利用高斯最小二乘微分校正(Gaussian Least-Squares Differential-Correction, GLSDC)算法得到六自由度导航信息。

由于VisNav系统使用位置敏感二极管PSD代替了传统的CCD光学器件，避免了复杂的图像处理过程，提高了测量精度及处理速度。VisNav系统在30米距离处精度在3厘米和0.25°左右，数据更新频率是DGPS的10倍(100Hz)。

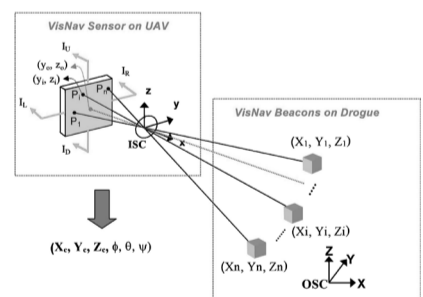


图5 基于PSD的导航引导技术原理示意图

但该项技术有不少风险，主要包括：

1. 需对加油锥套进行带电改装。PSD需安装在加油锥套或加油机上用于标识加油锥套或加油机位置，因此需要在用于燃油系统的锥套上新增带电元器件，风险较高。
2. 这种加装对加油锥套的稳定性影响尚未进行计算和估计，加装困难较大。
3. 仍然需要受油机通过红外光学或无线通讯控制安装于加油锥套上红外LED的开关和光强。
4. 技术成熟度较低。方案仍停留于实验室阶段，未能装机飞行测试。

光场导航引导技术

通用公司在过去的几年已经发展出了光场定位系统EOGRS(Electro-

optical grid reference system)，主要用于解决空中自主加油和无人机飞行器在GPS拒止环境下的相对定位问题。系统主要由以下三个主要部分组成，第一个部分是电光网格生成器，是一个激光发射装置，安装在加油机底部，提供加油机的临域内的相关位置信息；第二个是光场探测器，探测器主要安装在受油机和加油锥套上，感知光场信息；第三个是数据链，主要用于连接加油机、受油机和加油锥套。系统示意图如图6所示。

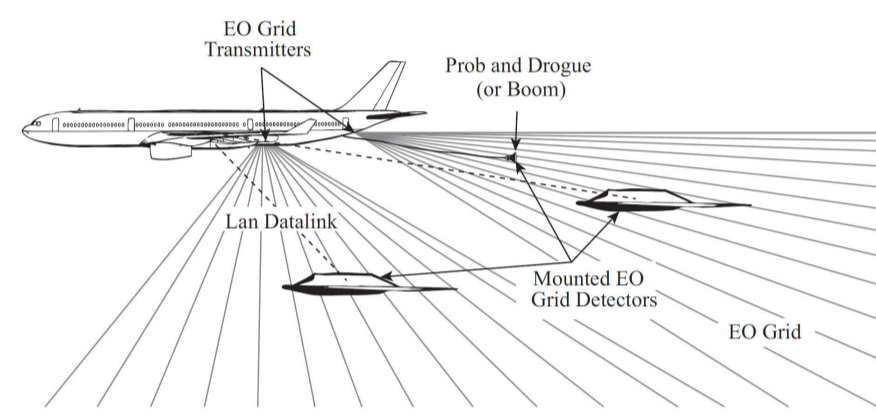


图6 光场导航引导技术原理示意图

依据GE公司官方消息，该系统已在向欧米伽航空空中加油服务，公司租赁的波音707加油机上装机完成相关飞行试验，但是飞行试验对象主要为加油锥套，并未对包括受油机在内的整个加油过程进行完整的模拟，且并未公布测试数据。

激光导航引导技术

激光导航引导技术是用于探测周围环境的典型探测定位技术。对自主空中加油而言，激光导航引导技术相较于光学相对定位技术具有更好的大气环境适应性，包括对云、雾等影响能见度的相关气候。与地面使用不同，当飞机在飞行时，环境背景非常干净，这也大大有利于激光导航引导系统的感知精度提高。

从对周围环境的感知方式而言，激光导航引导技术主要分为扫描式激光导航引导技术和非扫描式激光导航引导技术。

扫描式激光导航引导技术。现在最成熟的技术是扫描式激光导航引导技术。即通过调整不同发射方向，发射出光信号，测量相关距离信息，然后将距离信息拼接成3D信息。从扫描的方式可以区分为机械式激光雷达和半固态式激光雷达。与机械式激光雷达相比，半固态式激光雷达是将笨重的机械式扫描机构转换为基于MEMS的微镜扫描机构，缩小了体积和重量。

美国空军工程大学研究了扫描式激光成像在无人自主空中加油中的应用。其选择民用缩比飞机安装上商用激光成像装置和相关设备，进行试飞数据采集，并将测试数据与GPS数据进行比对，研究其精度等关键因素，结果表明，扫描式激光成像精度已能支持相关应用。

非扫描式激光导航引导技术。美国麻省理工学院的林肯实验室、普林斯顿大学、空军实验室等分别在开发用于单脉冲方法的焦平面探测器(APD/PIN)和专门的信号处理器。该系统采用闪光法成像，激光器一个脉冲照明整个目标，阵列探测器的每一个单元

独立的得到目标上对应点的距离和反射率信息，然后给出目标的3D图像和反射率图像。每个探测单元都是独立的，并且有自己的信号处理部分，这些信号处理部分集成在一起构成一个专用的集成信号处理器。

美国传感器公司(ASC, American Sensors Corp)公布了采用激光探测器的空中加油激光三维成像雷达研究计划，非扫描Flash成像体制，成像视场30°，成像距离30米。ASC公司在15米左右距离上进行了室

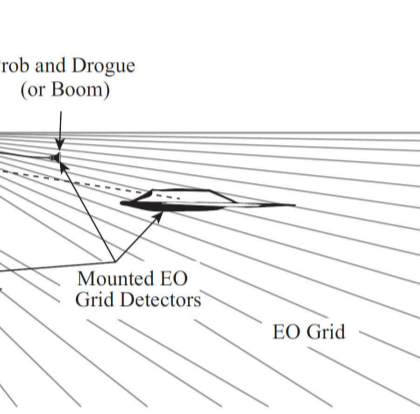


图7 试验用LiDAR装置。(1) LUX 8L 激光传感器 (2) Prosilica 1660C 摄像机 (3) NovAtel SPAN-SE GPS接收机

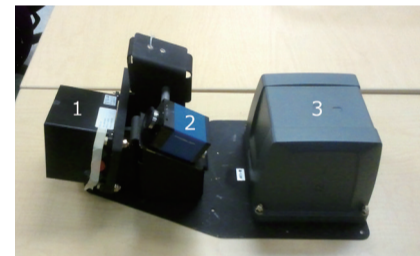


图7 试验用LiDAR装置。(1) LUX 8L 激光传感器 (2) Prosilica 1660C 摄像机 (3) NovAtel SPAN-SE GPS接收机

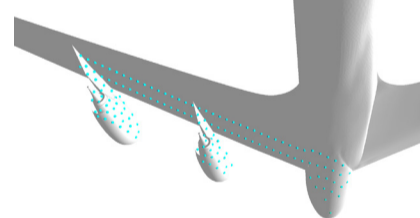


图8 LiDAR装置扫描示意图

内模拟试验，激光雷达成功捕获加油锥套模型并提取出锥套外轮廓，标定出锥套中心位置，成功引导目标接近锥套中心。

但激光导航引导技术在自主空中加油应用中仍具有一定不足。虽然其相较于视觉定位距离精度高，但其成像分辨率较低，可能存在对方位定位不准的情况。其次激光导航引导精度技术成熟度较低，还处于实验室阶段，仍需开展进一步的研究，促进工程化应用。

美军已完成的X-47B无人自主空中加油飞行试验，标志着美军正式掌握了无人自主空中加油技术。我国在不断探索发展自主空中加油技术的过程中，经过相关调研和技术研判，暂时还未有一种成熟的导航引导技术方案能够覆盖所有应用需求。随着高精度传感器的性能提升、控制策略和使用方案的实用性化，各种相对导航引导技术在现有技术上不断发展，应当结合各种导航引导技术优缺点，对各种技术进行有机组合，最终形成多体制组合导航引导技术，最终使自主空中加油技术走向工程化应用。

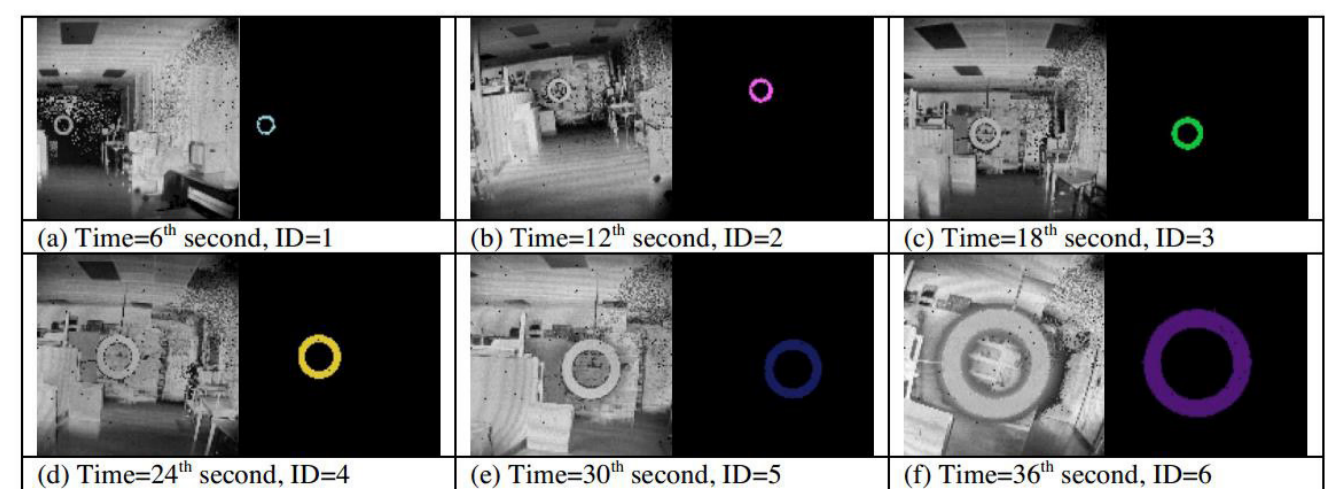


图9 ASC公司激光三维成像雷达对加油锥套模拟成像实验