中国科学:信息科学 2019年 第49卷 第5期:507-519

SCIENTIA SINICA Informationis

无人机自主飞行技术专题・评述



无人机景象匹配视觉导航技术综述

赵春晖^{1,2*},周昳慧^{1,2},林钊^{1,2},胡劲文^{1,2},潘泉^{1,2}

1. 西北工业大学自动化学院, 西安 710000

2. 信息融合技术教育部重点实验室, 西安 710000

* 通信作者. E-mail: zhaochunhui@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2018-11-29; 接受日期: 2019-02-28; 网络出版日期: 2019-05-14

国家自然科学基金 (批准号: 61473230, 61603303)、陕西省自然基金 (批准号: 2017JM6027, 2017JQ6005) 和地理信息工程国家重 点实验室开放基金 (批准号: SKLGIE2015-M-3-4) 资助项目

摘要 高精度定位与导航是实现无人机自主飞行、高效侦察与精确打击的关键技术之一.景象匹配 视觉导航技术因其设备结构简单、被动式、定位精度高等特点,能与惯性系统组合构成自主性很强 的高精度导航系统.通过分析当前基于景象匹配的无人机视觉导航技术研究现状,发现国外研究主 要集中于单独利用视觉图像信息进行飞机姿态、导航信息提取以及联合 IMU 等传感器的组合导航 系统;国内该领域的研究鲜见报道,但对该技术所涉及的惯性组合导航、视觉/激光测距三维地图重 建、视觉导航着陆应用等技术进行了大量研究.本文总结了无人机景象匹配视觉导航技术的特点、 分类与研究方法,得出在不同时间、不同视角、不同光照、不同分辨率、不同平台以及不同传感器 等条件下,在高精度、强实时、鲁棒、连续视觉导航任务中,无人机景象匹配视觉导航需突破的关键 技术.

关键词 无人机,视觉导航,景象匹配,图像匹配,惯性导航

1 引言

美国国防部公布的《2007-2032 年无人机路线图》^[1] 指出:未来无人机应具有自主飞行、高效综合 侦察感知与精确打击能力.要实现无人机自主飞行、高效侦察与精确打击,高精度定位与导航能力是 关键技术之一.

目前无人机定位导航主要有惯性导航、全球卫星导航、无线电导航定位与航程推算等.惯性导航 系统 (inertial navigation system, INS)^[2] 自主性好,可不依赖外来信息,也不向外辐射任何信息,短时 精度高,其主要缺点是定位误差随时间快速积累,而高精度的惯性导航系统不但重量、体积较大,且造 价昂贵.全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS,包括 GPS, GLONASS, Compass 和 Galileo 等)^[2] 定位精度高,其误差不随时间积累,但自主性能差,容易受干扰,信息更新速率较低,

 引用格式: 赵春晖,周昳慧,林钊,等. 无人机景象匹配视觉导航技术综述. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 507-519, doi: 10.1360/ N112018-00316
 Zhao C H, Zhou Y H, Lin Z, et al. Review of scene matching visual navigation for unmanned aerial vehicles (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 507-519, doi: 10.1360/N112018-00316

ⓒ 2019《中国科学》杂志社

难以满足高动态和某些场合的实时控制要求, 在军事中 GNSS 只能作为一种辅助导航系统. 无线电定 位系统由无线电测控系统或雷达系统组成, 通过发射机发射电磁波, 接收机通过天线接收到信号, 然后 根据电磁波的速度及发射至回波间隔时间, 测量出无人机相对地面站的距离, 由测得的飞机方位角和 高低角、飞行高度确定飞机的相对位置; 它们的定位精度虽与时间关系不大, 但易受干扰, 而且必须依 赖地面站. 航程推算^[3] 是通过无人机的空速、高度、姿态等传感器数据和风速, 实时推算无人机的位 置, 其误差受机载传感器精度及风速测量的影响, 并且会随时间的增加而积累.

由于单一导航系统往往无法满足实际需求,以惯性导航为主,其他导航手段为辅的组合导航系统 成为目前导航系统主流,组合导航系统能大大提高导航系统的精度和可靠性.

景象匹配始于巡航导弹末制导^[4],后来渐渐发展成一种视觉导航技术^[5].景象匹配导航 (scene matching navigation systems, SMNS) 具有设备结构简单、被动式、定位精度较高等特点,采用图像传感器获取飞行或目标区附近的区域图像与存贮的基准图像进行匹配,获取飞行器位置数据.区别于其他主动导航技术,景象匹配导航作为一种辅助导航方法,与惯性导航系统相结合可构成自主性很强的高精度导航系统,使无人机具备"视觉"能力,利用图像匹配搜索、识别、瞄准等实现精确打击.

本文主要总结了该领域近十年的相关工作, 第2节分析了基于景象匹配的无人机视觉导航研究现 状及系统组成, 第3~5节总结了景象匹配导航相关技术的研究现状, 最后给出未来无人机景象匹配视 觉导航工作需要突破的关键技术.

2 基于景象匹配的无人机视觉导航研究现状

景象匹配无人机视觉导航系统开发得到了国外众多机构的重视^[6~14],可分为单独利用视觉传感 器图像信息进行飞机姿态、导航定位系统,以及联合 IMU 等传感器的导航系统.

美国乔治亚理工学院 (Georgia Institute of Technology)^[15] 利用 IMU、摄像头、红外传感器、激光 测距仪和声纳一起实现了智能自主导航.爱荷华州立大学 (Iowa State University)^[16] 用 IMU 和单目 摄像头实现了规则走廊内的自主飞行.澳大利亚莫纳什大学 (Monash University) 电气与计算机系统 工程学院^[17] 构建了基于视觉的无人机导航系统.韩国光云大学 (Kwangwoon University) 图像处理系 统实验室^[18] 利用机载成像传感器实现了一个完整的图像导航系统,系统分为相对位置估计和绝对位 置估计两部分^[19]:相对位置估计利用相邻两帧图像建立立体成像模型用于更新无人机位置信息;绝对 位置估计采用景象匹配,矫正相对位置估计误差.瑞典林科坪大学 (Linkoping University) UASTech 实验室^[20] 针对无人机定位进行研究,利用航程计、惯性和景象匹配提出了一种适用于卫星导航系统失效情况的无人机导航系统.瑞士联邦理工学院 (Swiss Federal Institute of Technology Zurich)^[21] 利用 IMU 和渔眼摄像头实现了平台的搭建.葡萄牙系统和机器人技术实验室^[22] 利用惯性 IMU 和激光测距仪构建了自主导航系统.

景象匹配视觉设备可包括单目、双目、多目、鱼眼等形式的传感器,有可见光、红外、激光等,研究的方法包括特征提取、特征匹配、光流分析、仿生学等以及各种组合导航.

美国斯坦福大学 (Stanford University) 的 Sai Prashanth Soundararaj 和康奈尔大学 (Cornell University) 的 Ashutosh Saxena^[6] 实现了在已知环境下仅依靠单目视觉的自主飞行,成功利用单目视觉来估计位置信息以及依靠光流进行 3D 定位和导航; Byrne 等^[7] 应用双目视觉进行了自主导航,并且还验证了双目视觉在无人机避障的应用; Thrun 等^[8] 在无人直升机上安装了机器人用二维激光扫描 仪实现场景重构; Oh 等^[9] 提出一种利用基于光流场的 FOE (focus of expansion) 方法实现无人机在 类似山谷地形地带的飞行; Metni 等^[10] 提出从序列图像中估计单应矩阵,得到无人机不同时刻的相对



Real-time graph generation

图 1 无人机景象匹配导航系统框图

Figure 1 Diagram of UAV scene matching navigation system

位置信息, 并解耦单应性矩阵得出无人机的姿态变化和位移变化, 进行景象深度估计的方法. 马里兰 大学 (University of Maryland) 的 Conroy 等^[11] 深入研究仿生学, 设计了一个抛物面状的光流反射面, 从而像昆虫一样获得全局的光流信息, 以期获得更准确的位置估计, 并成功用于四旋翼无人机. 新西兰 坎特伯雷大学 (University of Canterbury) 的 Stowers 等^[12] 成功实现了利用安装在无人机底部的对地 摄像头检测光流信息, 对无人机航向进行估计, 并和惯导数据融合解算导航信息. Weiss 等^[13] 使用下 视全向单目摄像头, 实现了无人机在线自主飞行, 采用基于特征点的 SLAM (simultaneous location and mapping) 方法提高了处理系统的快速性, 并通过图像的网格分割估计, 结合 Delaunay 三角算法估计 特征点景深, 从而大大降低了解算难度; 2010 年在德国国防部支持下 Kleinert 等^[14] 成功实现了单目 视觉下的 SLAM 和 IMU 数据的融合算法, 完成了和室外多处场景全局地图构建.

虽然我国在无人机视觉导航技术领域的研究鲜见报道,但对该技术所涉及的小型无人机研制、惯 性组合导航、视觉/激光测距的三维地图重建算法、视觉导航着陆应用等技术进行了大量研究,并取得 了一系列成果.国内如北京航空航天大学、浙江大学、清华大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、中 国人民解放军国防科技大学、南京航空航天大学等高校均开展了小型无人机空气动力学、结构设计、 控制原理、微系统集成等基础研究,研制了不同类型的样机,并且成功地进行了特定算法的验证测试.

北京航空航天大学的 Diao 等^[23], Zhou 等^[24] 设计了基于惯导和摄像机的无人机自动着陆系统及 其导引算法; Zhang 等^[25] 研究了在未知的、动态的走廊环境中,采用双目立体视觉引导 VTOL 无人 机安全飞行方法; Fang 等^[26], Xu 等^[27] 分别就小型无人机自动驾驶技术、视觉导航算法以及目标跟 踪策略等进行了深入研究. 浙江大学的 Pan 等^[28] 提出了一种利用单/双目视觉估计无人机高度和偏 航角的方法; Ren 等^[29] 研究了基于视觉信息的微型无人直升机的位姿算法; Xiong 等^[30] 研究了基于 激光测距仪、视觉传感器和环境特征跟踪过程中的地图创建和算法问题. 清华大学的 Wu 等^[31] 对无 人机视觉导航的现有算法从视觉处理和状态估计与数据融合两大方面作了分类总结, 讨论了无人机获 取图像的特征提取、视觉传感器同其他传感器的数据融合, 以及实时得到状态估计的各种方法, 也涉 及了未知环境下地图的建立问题. 西北工业大学的 Pan 等^[32] 研究了基于空间关系几何约束的无人机 景象匹配导航方法; 国防科技大学的 Yu 等^[33] 进行了无人机自测速方法与试验, 验证了序列图像算法 的正确性; Zhou 等^[34] 在对 TIP (tour into a picture) 技术进行扩展的基础上, 提出了一种能够在未知 视点路径的图像序列中实现场景漫游的方法.

无人机景象匹配导航系统如图 1 所示, 在获取目的地后通过卫片、航片进行初步的路径规划, 随 后选取该规划航路上的适配区通过校正获得基准图, 再将视觉传感器获得的实时图与基准图进行匹配, 实现导航与定位. 它的核心是图像匹配算法, 其性能好坏直接决定了导航系统的性能^[35].

3 适配区选取

景象适配区选取^[36]就是按照一定的要求或准则在飞行航迹上选取信息量大、可匹配性好且大小满足要求的图像作为导航基准图,其目的是保证飞行过程中机载成像传感器获得的实时图与预存基准 图实现成功匹配,其关键技术为特征指标的选定和匹配区的确定.景象匹配区目前主要是依靠人工选 取.然而,人工选取匹配区工作量大,速度慢,尤其易受操作人的经验、专业等因素的影响,一般不易 找出客观的、满足要求的匹配区.为了使所选取的匹配区有较好的适配性,有效的图像特征指标尤为 关键.

3.1 特征指标的选取

目前反映图像性能的特征指标有很多,但每一项特征指标往往只能反映某一方面的特性.选取特征指标时,不仅要考虑到匹配区的需要,还要能够满足匹配算法的要求,综合相关文献^[37~39]选取特征指标时需遵循的 5 项基本原则如下:

信息量:景象匹配区要有足够量的信息才能进行匹配定位,图像中包含的信息越丰富,信息量越大,越有利于成功匹配,因此选取的特征指标要能反映图像中信息量的大小,即信息丰富程度.目前采用的信息量度量方法有图像方差、信息熵、独立像元数、边缘密度、累加梯度等^[40].

• 稳定性: 在景象匹配过程中,实时图和基准图获取的传感器不同、时间差异、季节变化、光线强弱等因素,使得两者提取到的特征可能存在差异,从而导致错误匹配,所以特征指标要保证匹配区具有稳定不变的特性,即能够反映景象区域稳定性的特征.匹配区稳定性可通过 Frienden 灰度熵和边缘连续性来反映.

• 唯一性: 如果匹配区内有多个相似的明显地物, 会明显降低匹配成功概率甚至导致错误的匹配. 因此, 特征指标要能反映匹配区地物特征的唯一性.

显著性:为得到较高的匹配精度,匹配区内必须具有明显区别于其他位置的、相关峰值足够大同时相关峰足够尖锐的点.相关面是衡量匹配图像每一个位置的相似性测度的一个指标,可通过判断其是否包括重复模式来分析图像匹配区的显著性.

•大小一定:这里所说的大小一定,即要求匹配区大小要满足基准图要求.

3.2 适配区选取算法

1972年, Johnson^[41]首次提出了景象匹配区选择的概念、理论和方法. Liu 等^[42]综合研究匹配 概率与独立像元数、方差、互相关峰特征、纹理能量比的关系,通过在基准图上截取一定数量的实时 图,统计这些参数来判断该基准图是否适合于进行景象匹配; An 等^[43]对影像的可匹配性与影像所包 含的信息量之间的关系进行了探讨,用信息熵或影像梯度来度量图像的可匹配性; Guo 等^[44]构建了 一种基于数据库的景象匹配适应性分析平台,以完成匹配仿真实验和适应性分析功能; Jiang 等^[45]提 出了一种由粗到精的层次景象匹配区选取准则,定义了稳定强度和广义最高峰尖锐度,从匹配区选取 的策略上分析了匹配区的选取问题. 文献 [46] 设定了多个评价适配区信息特点的指标,通过主成分分 析法,客观、定量地分析适配区的导航性能,从而选择最佳导航适配区. 为了实现适配区的基准作用, 同时尽可能确保选取的基准图与实时图匹配的精确性,从而保证精准导航,研究人员在特征考量、影 像匹配性和稳定强度等方面做出了许多富有贡献性的研究.

适配区选取方法大体分为两类:一类是由粗到细的方法,先选定不同的待定区域,对这些区域做 适配性检验比较得出适配区^[47~49];另一类是由小及大的方法,直接对所有像素点进行适配性计算,先

Algorithm type	Principle	Characteristic
Based on gray	Gray information for similarity measuremet matching	No image segmentation and feature extraction
		Poor resistance to geometric deformation and interference
		The computation increases with the increase of image size
Feature-based	Extract points, lines and regions as features	Feature construction and extraction are complex
		Good adaptability to deformation and occlusion
		Incomplete feature extraction leads to low accuracy
Explanation-based	The relational feature and semantic network for matching	Semantic features are difficult to extract
		Closer to human cognitive ability
		Can improve the matching accuracy

表 1 三类图像匹配方法原理及特点

 Table 1
 Principles and characteristics of three types of image matching methods

确定适配最佳点,再将以此为中心的区域作为适配区^[50,51].

对于第1类方法,先设定模板大小或先根据 Mumford-Shah 模型划分出匹配稳定区或不稳定区, 粗选出一些待定适配区,对这些适配区通过特征指标的方式进行筛选,确定最终的适配区.这种方法 比较简单也比较常用,但是因为备选适配区是随机选定的,有可能会使得适配区的位置并不是全图最 优.对于第2类方法,对整幅图片的所有像素点进行特征考核,选出最优适配点,并以此为中心选定适 配区.这种方法计算量比前者大,一般可以找到全图最优适配区.

4 图像匹配

图像匹配 (image matching) 是把从相同或不同传感器在同一区域获取的两幅图像在空间上进行 对准,以确定出这两幅图像间相对位置关系的过程,其目的主要是搜索实测图像在基准图像中的最佳 匹配位置^[52,53].由于一般情况下景象匹配中的惯性导航系统能提供高度、航向等辅助信息,在预处理 中可以对实测图像进行校正处理,使得校正后的实测图像与基准图像间旋转,尺度差异一般相差不大, 并且景象匹配是利用图像的景物特征来进行匹配,从而使景象匹配为图像匹配的一个特例.针对景象 匹配导航系统,人们提出了许多图像匹配方法,这些方法基本可以分为基于灰度区域的匹配方法、基 于特征的匹配方法和基于解释的图像匹配方法 3 类.这 3 类图像匹配方法原理及特点如表 1 所示.

4.1 基于灰度区域的匹配方法

基于灰度区域的匹配方法是直接利用图像灰度信息进行相似性度量匹配,其性能主要取决于相似 性度量及搜索策略的选择,这类算法目前已发展的比较成熟.常用的似性度量算法有:平均绝对差算 法、平均平方差算法、归一化互相关算法、序贯相似性检测算法、互信息算法、快速 Fourier 变换、相 位相关算法、频域相关法、模糊信息算法、图像直方图与投影特征法、主成分分析法等.目前在飞行 器导航中所采用的基于灰度区域的匹配算法主要有平均绝对差算法和归一化互相关算法.

基于灰度区域的匹配方法原理简单,不需要进行图像分割和图像特征提取,但由于灰度信息易受 天气、光照变化、噪声及各种外部因素的干扰,灰度相似性不如几何特征的相似性稳定,抗几何变形能 力差,其匹配定位精度和可靠性难以保证.同时需要检测两幅图像中所有对应象素灰度的相似程度或 差异程度,匹配运算量随图像大小的增加迅速增大.

4.2 基于特征的匹配方法

基于特征的匹配方法首先从匹配图像中提取特征,用对应的相似性度量和相关约束条件确定实测 图像在基准图像中的位置.该类算法可以引入估计匹配图像间的几何失真机制,从而使匹配算法具有 抗图像几何失真的能力,有效消除由于背景、局部环境或光照等造成的局部辐射失真引起的误匹配. 基于特征的匹配方法得到广泛研究,在实际应用中越来越广泛.

特征匹配算法关键步骤主要包括图像特征提取和特征匹配.图像特征提取阶段,要求特征容易检测,且对图像噪声、变形不敏感.在特征匹配阶段,由于成像条件变化或成像传感器不同,同一地物反应出不同的频谱特性,因此要求特征选择和相似性度量必须考虑这些因素.虽然特征匹配算法对微小的噪声、图像旋转与尺度差异具有一定的鲁棒性,但实际应用中目前还没找到一种能够满足各种应用要求的匹配算法.一般都是依据所用特征的不同,对特定的应用环境采用和设计相应的匹配算法.

目前基于特征的匹配方法大体可分为基于点、线、区域等特征的匹配方法.

4.2.1 点特征匹配

基于点特征的匹配方法是先提取图像的角点、边缘点、线交叉点或分支点等特征,然后进行特征 匹配.点特征的匹配方法主要包括有 Hausdorff 距离匹配方法、松弛匹配方法、Hough 变换匹配方法 以及点匹配函数优化法等.其中 Hausdorff 距离计算快捷,且不需要点对点精确匹配,对局部非相似变 形不敏感,因此在景象匹配、识别等方面得到广泛应用.但经典 Hausdorff 距离采用的最大最小距离对 出格点噪声和遮挡敏感,即使两个图像非常相似,少数出格点的存在也可能会导致距离计算的严重错 误.许多研究者对其进行改进,如 Huttenlocher 等^[54]提出部分 Hausdorff (partial Hausdorff distance, PHD)距离来处理含有严重遮挡或退化问题的图像;而 Leng 等^[55]先提取出图像中的边缘点和分支特 征点,然后依据边缘点和分支特征点对 Hausdorff 有向距离贡献的大小不同,采用加权 Hausdorff 距离 (weighted Hausdorff distance, WHD)进行图像匹配,获得了较好的结果.而针对松弛匹配技术在实际 应用中受到运算量大、匹配速度慢的限制,文献 [56]给出了用 Hopfield 神经网络实现概率松弛过程的 一种方法,并实现了二值化门限的功能.文献 [57,58]利用 Hopfield 神经网络实现人点特征匹配. Taha 等^[59]提出了一种计算精确 Hausdorff 距离的方法,计算复杂度接近线性,在大数据集的计算中表现良 好. Chen 等^[60]提出了局部起始点搜索算法 (LLS) 计算 Hausdorff 距离,利用了点集的空间位置信息, 显著降低了计算复杂度. Deng 等^[61]提出了点对局部拓扑特征 (point-to-point local topology, PPLT), 结合不变特征和概率松弛改进了点模式匹配算法 (PPM),提高了匹配的效率和准确度.

4.2.2 线特征匹配

基于线特征匹配方法是采用基本直线、目标轮廓曲线、道路及道路网结构等作为特征,然后采用 链码匹配、正则化小波描述子、小波描述矩、特征一致性 (feature consensus) 以及 Fourier 描述子等技 术进行匹配. 文献 [62] 提出了利用线特征的相对位置关系完成航空照片和地图配准的松弛匹配技术, 但该方法当图像间存在旋转变化时效果很差. 文献 [63] 提出了利用线特征相对方位的松弛匹配算法, 可以估计图像间的旋转角度. 文献 [64] 则利用特征一致性思想,并通过计算结构特征边缘的斜率分布 直方图的互相关值来估计图像之间的旋转角度. 文献 [65] 利用线特征间夹角和长度比具有相似不变性 的性质,建立直线长度比直方图和角度差直方图估计图像变换参数. 基于线特征的匹配多数利用了夹 角和长度比的不变性等特点,首先估计图像间的比例和旋转因子,然后建立特征间的对应关系,确定 最终变换参数. 文献 [66] 则采用轮廓线不变矩来实现图像匹配. 文献 [67] 针对影像中提取的线特征经 常出现断裂、变形、遮挡等问题,利用单应性约束结合核线约束精简候选线特征数量,提出一种结合离散化描述与同名点约束的航空影像线特征匹配算法,可实现曲线匹配及断裂线特征的多对多匹配.

4.2.3 区域特征匹配

基于区域特征匹配方法是提取具有显著特征的封闭轮廓区域,如水库、湖泊、建筑物或点特征的局部区域等,然后直接采用各种相似性度量函数^[68]建立特征区域间的对应关系,或先用不变特征描述子,如 Hu 不变矩、Zernike 矩、SIFT 描述子等对区域进行抽象描述,并通过特征描述子的相关性建立特征间的对应关系,进而确定图像变换参数.如文献 [69] 利用 SIFT 算子^[70]具有对尺度、旋转和光照鲁棒的特点,提出一种适用于大视场下的景象目标快速匹配算法.而文献 [71] 在以特征点为中心的局部区域构建 Hu 不变矩描述子,然后度量特征点对应的描述子之间的相似性来建立特征点之间的匹配关系.文献 [72] 提出了虚拟圆 (virtual circles) 区域特征,虚拟圆是边缘特征的最小内切圆,具有比例不变性.

尽管基于特征的匹配方法具有很多优点,但算法复杂,而且往往由于特征提取不完全,导致正确 匹配率较低.

4.3 基于解释的图像匹配方法

基于解释的图像匹配方法是建立在对图像正确解释的基础上,首先需要建立模型,以及模型与现 实世界物体或现象之间的对应关系,然后利用图像的结构特征或关系特征作关联搜索,建立图中结点 之间的关系,借助语义网络、框架理论和图论方法寻求解决匹配问题,但目前这种匹配方法远不成熟.

由于实测图像与基准图像的成像时间、成像条件不同,经预处理校正后的实测图像与基准图像之间仍然会存在着不同程度的灰度差别、几何失真、旋转与尺度变化等,从而极易导致错误匹配.为此,研究者们提出了一系列改进方法^[73~82],如增量符号相关、不变矩等算法.采用对数极坐标、圆投影、局部不变描述子、不变矩、Fourier-Mellin 变换以及直线倾角直方图不变矩等方法先对图像进行变换,然后再进行匹配处理来克服旋转与尺度变化的影响.为了提高图像匹配定位精度,提出了快速 Fourier 变换、相位相关、最小二乘法、Bayes 等匹配方法.为进一步提高图像匹配算法的鲁棒性,研究学者采用各种约束条件如多子区及空间几何约束关系、时空关联、三视约束关系、对极几何约束以及多帧匹配一致性决策等来剔除错误匹配点从而实现图像的稳健匹配.

由于景象匹配过程中需要在大范围内搜索,这样会大大增加匹配计算量.围绕减少搜索空间和提高匹配速度问题,人们相继提出了序贯相似性检测的算法 (SSDA)、多级模板匹配、金字塔多分辨技术或采用遗传算法、粒子群算法与蚁群算法等快速优化搜索算法来实现图像的快速匹配^[83~85].

5 景象匹配导航定位

景象匹配导航技术由于具有定位精度和自主性高等优点而受到人们的高度重视,并在无人飞行器 组合导航中得到了广泛应用.利用机载高分辨率成像雷达或光电图像传感器实时获取地面景物图像, 并与机载计算机中预先存储的地物景象数字基准图进行比较,精确地计算出飞行器位置以修正航向误 差,同时可借助获得的位置信息来消除惯导系统长时间工作的累积误差,从而提高飞行器的导航定位 精度和自主性. 文献 [86] 以人类视觉系统的图像结构相似性度量为基础,使用双树复小波变换方法,将复小波变换域下的结构相似性度量应用于景象匹配系统中,提出了对于图像空域变换具有较强鲁棒性的景象匹配方法.对于实时图存在对比度、光照变化等干扰情况表现出较好的鲁棒性.文献 [87] 提出了一种基于景象匹配的航摄影像二维定位方法,首先进行任务规划,来获取某固定区域的航摄影像.然后基于特征匹配算法来完成景象匹配.最后提出坐标解算及底图生成方法,来实现航摄影像二维定位.文献 [88] 首先采用 CenSurE 特征星型滤波器 (CenSurE-star) 提取基准图和实时图中的特征点,并生成 FREAK 二进制描述符;然后将 Hamming 距离作为特征点的相似性判定度量,采用 K 近邻距离比值的方法提取匹配点对;最后利用基于 RANSAC 的定位模型得到空间几何变换关系,实现图像匹配并获取定位点经纬坐标.文献 [89] 针对景象匹配中颜色可变性和图像时变性的挑战性问题,提出使用精确的直方图匹配在感知图像上自动提取区域检测地标,随后与库进行匹配,最后利用仿射变换最小化定位误差的优化方法计算无人机的定位.景象匹配导航定位技术向着越来越有挑战性的场景研究,如光照变化导致的对比度、颜色变化等场景,由于景象匹配中的基准图和实时图通常是在不同时间不同场景拍摄,两幅图的成像条件可能不同,造成实时图和基准图之间可能存在一定的差异,这就要求匹配算法能利用图像的不变特征量实现对图像变化的鲁棒性.

在景象匹配定位方法中, Hausdorff 距离由于具有计算快捷、不需要点对点精确匹配和对局部非 相似变形不敏感等优点而得到了广泛的应用. 对于经典 Hausdorff 距离匹配算法中仅考虑图像间边缘 点的几何关系, 而未充分考虑边缘点边缘测度显著性差异对 Hausdorff 有向距离贡献不同的特点, 文 献 [90] 研究了基于边缘测度的加权 Hausdorff 距离景象匹配方法. 该方法集合结构张量和局部均值比 方法构造出边缘测度图像, 并根据测度图提取图像边缘; 在图像匹配过程中, 基于边缘测度的显著性 不同, 对每个边缘点采用不同权值的加权 Hausdorff 距离进行图像匹配定位.

在匹配图像中边缘测度幅值越大,可以认为其相对其他匹配点越稳定,越不易受噪声干扰,在图像匹配过程中对应的权值 w_(a) 应该越大,反之越小.为了消除出格噪声点的干扰,将点集 A 中所有特征点到点集 B 的距离 d(a, B) 从小到大排序,共 N_a 个特征点,取前 k 个为与点集 B 相匹配的点,其余 (N_a – k) 个为非匹配点,相应的权值 w 取为 0.因此定义权值 w_(a) 计算公式如下:

$$w(a) = \begin{cases} \frac{|T(a)|}{\max_{a \in W} |T(a)|}, \ d'(a, B) \leq d'(a, B)_k, \\ 0, \qquad \text{otherwise.} \end{cases}$$
(1)

基于边缘测度加权 Hausdorff 距离算法的有向距离可以表示为

$$h(A,B) = \frac{1}{N_a} \sum_{a \in A} w(a) d'(a,B).$$
 (2)

它不仅考虑边缘点之间的几何距离,同时结合了匹配点之间的边缘测度差异对图像 Hausdorff 有向距离的影响,在很大程度上消除了由噪声点和出格点所引起的误匹配,提高了匹配精度.

6 展望

国内外对景象匹配技术开展了大量研究工作,已取得一定研究成果,但在实际应用中仍存在不少 困难和问题.基于无人机平台的景象匹配技术由于成像条件的变化,如不同时间、不同视角、不同光 照、不同分辨率、不同载台以及不同传感器等,获取的图像间往往是宽基线的,给准确、鲁棒的图像配 准带来巨大挑战.如何设计适应性强、计算速度快、定位精度高的景象匹配算法一直是无人机视觉导航研究的热点和难点.在未来的高精度、强实时、鲁棒、连续视觉导航任务中,景象匹配视觉导航需要 突破以下几个方面的关键技术:

适应不同场景的宽基线鲁棒景象匹配.由于景象匹配中的基准图和实时图通常是在不同时间不同场景拍摄的,两幅图的成像条件(包括传感器类型及姿态、季节和气候情况等)可能不同,造成实时图和基准图之间可能存在灰度差异、清晰度差异、几何畸变及遮挡等,这就要求匹配算法能利用图像的不变特征量实现对图像变化的鲁棒性.

满足视觉导航工程要求的快速景象匹配.导航系统对景象匹配实时性的要求很高,实时性差则匹配结果精度和可靠性再高也修正不了导航信息.而在匹配过程中,通常需要在基准图中较大范围进行搜索匹配,计算量较大,因而提高景象匹配的实时性至关重要.

跨适配区和非适配区的连续景象匹配导航.目前景象匹配导航仅局限于适配区导航,还没有一种跨越适配区和非适配区的连续景象匹配导航方法,导致景象匹配导航连续性差,严重限制了景象匹配导航的应用范围.研究跨适配区和非适配区的连续景象匹配导航方法,设计适应于不同景象匹配区域的、连续的景象匹配导航算法,是目前景象匹配导航系统工程化迫切需要解决的关键技术问题.

• 基于自然路标检测与识别的景象匹配定位误差校正. 在导航图像中识别出易于跟踪的地形特征, 如地表广泛分布的道路、河流等, 与飞行之前通过卫星正射影像图建立起来的全局地图导航地图库匹 配以确定这些特征的位置, 进而作为无人机的导航路标; 利用己识别的自然导航路标与无人机的相对 位置关系, 即路标视线方向, 通过最小二乘或 Kalman 滤波等方法估计无人机位置及姿态, 实现景象匹 配精确定位与累计误差校正.

基于交互式多模型的连续景象匹配导航模型切换.交互多模型算法具有自适应的特点,能够有效地对各个模型的概率进行调整.利用交互式多模型算法在各个景象匹配模型之间切换,可实现连续景象匹配导航.

综上所述,用于无人机视觉导航的景象匹配算法,不仅需要计算速度快,满足实时处理的要求,而 且需要具有一定的鲁棒性,可以适应图像的灰度变化、遮挡、模糊、旋转及尺度差异等不同情况.更重 要的是,景象匹配算法应具有跨适配区和非适配区的连续导航能力.无人机景象匹配视觉导航技术研 究的部分理论与方法尚不完善,在路标检测 – 匹配、解算 – 定位定姿过程中还存在许多困难,关系到 导航定位的多个关键环节,需要取得对以上关键技术的突破.

参考文献 —

- Jordan M J. Merging the tribes: streamlining DoD's acquisition of unmanned aerial systems. In: Proceedings of US Defense Technology Report: ADA449383, 2006. 1–213
- 2 Dong J W. Analysis on inertial navigation technology. Instrum Tech, 2017, (01): 41–43
- 3 Gu Y T. Research on navigation system of unmanned aircraft vehicle. Modern Navigation, 2013, (3): 198–201
- 4 Carr J R, Sobek J S. Digital scene matching area corre-lator (DSMAC). In: Proceedings of SPIE Image Processing for Missile Guidance, 1980. 238: 36–41
- 5 Reed C G, Hocan J J. Range correlation guidance for cruise missiles. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1979, 15: 547–554
- 6 Soundararaj S P, Sujeeth A K, Saxena A. Autonomous indoor helicopter flight using a single onboard camera. In: Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2009. 1–7
- 7 Byrne J, Cosgrove M, Mehra R. Stereo based obstacle detection for an unmanned air vehicle. In: Proceedings of IEEE Interna-tional Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2006. 2594–2599
- 8 Thrun S, Diel M, Hahnel D. Scan align-ment and 3-D surface modeling with a helicopter plat-form. In: Proceedings

of the 4th International Conference on Field and Service Robotics, 2003

- 9 Oh P Y, Green W E, Barrows G. Neural nets and optic flow for autonomous micro-air-vehicle navigation. In: Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, 2004. 1279–1285
- 10 Metni N, Hamel T, Derkx F. Visual tracking control of aerial robotic systems with adaptive depth estimation. Int J Control Autom Syst, 2007, 5: 51–60
- 11 Conroy J K, Gremillion G, Raganathan B N, et al. Implementation of wide-field integration of optic flow for autonomous quadrotor navigation. Auton Robot, 2009, 27: 189–198
- 12 Stowers J, Bainbridge-Smith A, Hayes M, et al. Optical flow for heading estimation of a quadrotor helicopter. Int J Micro Air Vehicles, 2009, 1: 229–239
- 13 Weiss S, Achtelik M, Kneip L, et al. Intuitive 3D maps for MAV terrain exploration and obstacle avoidance. J Intell Robot Syst, 2011, 61: 473–493
- 14 Kleinert M, Schleith S. Inertial aided mo-nocular SLAM for GPS-denied navigation. In: Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Salt Lake City, 2010. 20–25
- 15 Sobers D M, Johnson E N. Indoor navigation for micro aerial vehicles. In: Proceedings of AIAA Infotech at Aerospace, Atlanta, 2010. 1–29
- 16 Celik K, Chung S-J, Somani A. Mono-vision corner SLAM for indoor navigation. In: Proceedings of IEEE International Conference Ames IA: Electro/Information Technology, 2008. 343–348
- 17 Kong W Y, Egan G K, Cornall T. Feature based naviga-tion for UAVs. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, 2006
- 18 Sim D G, Jeong S Y, Lee D H, et al. Hybrid estimation of navigation parameters from aerial image sequence. IEEE Trans Image Process, 1999, 8: 429–435
- 19 Sim D G, Park R H, Kim R C, et al. Integrated position estimation using aerial image sequences. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 2002, 24: 1–18
- 20 Conte G, Doherty P. An integrated UAV navigation system based on aerial image matching. In: Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2008
- 21 Zingg S, Scaramuzza D, Weiss S. MAV navigation through indoor corridors using optical flow. In: Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District, Anchorage, 2010. 3361–3368
- 22 Vasconcelos J F, Silvestre C, Oliveira P, et al. Embedded UAV model and LASER aiding techniques for inertial navigation systems. Control Eng Pract, 2010, 18: 262–278
- 23 Diao C, Wang Y X, Wang J T, et al. Computer vision assisted autonomous landing of UAV. J Syst Simulat, 2008, 20: 495–498
- 24 Zhou F Q, Zhang G J. Vision guiding method with monocular camera. Chin J Sci Instrum, 2006, 27: 1129–1132
- 25 Zhang B H, Cai Z H, Wang Y X. Binocular stereo vision navigation for electric VTOL aircraft. In: Proceedings of 2010 Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, Shanghai, 2010. 298–303
- 26 Fang J C, Zhang X. Development of autopilot technology of small UAV. J Chin Inertial Tech, 2007, 15: 658–663
- 27 Xu C, Fan Y Z, Sheng X R, et al. Vision based navigation system of UAV and improvements of the corresponding filtering algorithm. J Beijing Univ Aeronaut Astronautics, 2010, 36: 1000–1004
- 28 Pan X, Ma D Q, Wu Y J. Estimating pitch attitude and altitude of unmanned aerial vehicle vision-based landing. J Zhejiang Univ, 2009, 43: 692–696
- 29 Ren Q Y, Li P, Han B. Vision-based mini unmanned helicopter pose and position estimation. J Zhejiang Univ (Eng Sci), 2001, 43: 18–22
- 30 Xiong R, Chu J, Wu J. Incremental mapping based on dot-line congruence for robot. Control Theory Appl, 2007, 24: 170–176
- 31 Wu X L, Shi Z Y, Zhong Y S. An overview of vision-based UAV navigation. J Syst Simulat, 2010, 20: 62–65
- 32 Li Y J, Pan Q, Zhao C H, et al. Scene matching navigation for UAV based on spatial relationship geometric constraints. Appl Res Comput, 2010, 27: 3822–3846
- 33 Yu Q F, Li Q, Lei Z H, et al. Methods and experiments of velocity measurement of UAV from image sequence. Acta Aeronaut ET Astronaut Sin, 2009, 30: 1503–1507
- 34 Wu Q Y, Zhou D X, Cai X P. Construction of virtual environment from image sequences. J Image Graph, 2006, 11:

113 - 118

- 35 Guo Q. Scene matching technology development outline. Infrared Laser Eng (Supplement), 2007, 36: 57-61
- 36 Zhang Y Y, Su J, Li B, et al. Research on scene matching flexibility of scene matching navigation. In: National Security Geophysics Series. 2015 [张阳阳, 苏娟, 李彬. 景象匹配制导中景象匹配适应性研究. 见: 国家安全地球物 理丛书 (十一)—— 地球物理应用前沿. 2015]
- 37 Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a sur-vey. Image Vision Comput, 2003, 21: 9771000
- 38 Meth R, Chellappa R. Stability and sensitivity of topo-graphic features for SAR target characterization. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, 1997, 3: 464–467
- Cave R G, Harley P J, Quegan S. Registering SAR images to digital map data using a template matching technique.
 In: Proceedings of Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, Espoo, 2002. 1429–1431
- 40 Liu Z H, Wang H, Chen B G. Research on selection for scene matching area. Comput Tech Develop, 2013, 23: 128–133
- 41 Johnson M. Analytical development and test results of acquisition probability for terrain correlation devices used in navigation systems. In: Proceedings of Aerospace Sciences Meeting, San Diego, 2013
- 42 Liu Y, Zhao F W, Jin S L. New method of selecting scene matching reference map. Infrared Laser Eng, 2001, 30: 168–229
- 43 An R, Jin X L, Wang H L, et al. Image ability to obtain correct matching based on feature matching. Infrared Laser Eng, 2005, 34: 469–473
- 44 Guo W P, Sun J Y, He F F, et al. Platform for adapta-bility analysis of scene matching based on database. Infrared Laser Eng, 2006, 35: 738–741
- 45 Jiang B, Chen Y. A rule of selecting scene matching area. J Tongji Univ, 2007, 35: 830-833
- 46 Huang J L, Tan X Z, Zhang X Y. Selection of adaptive area in geomagnetic navigation based on the principal component analysis. J Naval Aeronaut Astronaut Univ, 2018, 159: 17–23
- 47 Xu X S, Tang J J, Zhang T, et al. Selection for matching area in terrain aided navigation based on entropy-weighted grey correlation decision-making. J Chin Inertial Tech, 2015, 23: 201–206
- 48 Li J, Yang X, Yang L. Mumford-Shah model based critical subset segmentation from navigation reference images. Acta Automat Sin, 2004, 30: 45–56
- 49 Zhang Y Y, Su J, Li B, et al. SAR scene matching area selection based on multi-attribute comprehensive analysis. J Projectiles, Rockets, Missiles Guidance, 2016, 36: 104–108
- 50 Luo H B, Chang Z, Yu X R, et al. Automatic suitable-matching area selection method based on multi-feature fusion. Infrared Laser Eng, 2011, 40: 2037–2041
- 51 Li J, Yang X. Approach to selection of suitable-matching area from reference image. J Data Acquisition Process, 2000, 15: 495–499
- 52 Su K, Guan S Y, Liu J. A practical normalized cross correlation algorithm for scene matching systems. J Astronaut, 1997, 18: 1–7
- 53 An R, Wang H L. Investigation of image matching algorithm for aircraft guidance. In: Proceedings of the 13th National Conference on Image and Graphics, Nanjing, 2006
- 54 Huttenlocher D P, Klanderman G A, Rucklidge W J. Comparing images using the Hausdorff distance. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1993, 15: 850–863
- 55 Leng X F, Liu J Y, Xiong Z. A real-time image matching algorithm for navigation system based on bifurcation extraction. Act Automat Sin, 2007, 33: 678–682
- 56 Yu S S, Tsai W H. Relaxation by the Hopfield neural network. Pattern Recogn, 1992, 25: 197–209
- 57 Shen W M, Zhang Z X, Zhang J Q. Image matching by neural network based relaxation. J Wuhan Tech Univ Surv Mappiing, 1996, 21: 247–251
- 58 Sang N, Zhang T X, Wei L G. Relaxation Matching by the Neural Network. J Commun, 1996, 17: 52–56
- 59 Taha A A, Hanbury A. An efficient algorithm for calculating the exact Hausdorff distance. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2015, 37: 2153–2163
- 60 Chen Y, He F, Wu Y, et al. A local start search algorithm to compute exact Hausdorff Distance for arbitrary point sets. Pattern Recogn, 2017, 67: 139–148
- 61 Deng W, Zou H, Guo F, et al. Point-pattern matching based on point pair local topology and probabilistic relaxation labeling. Vis Comput, 2018, 34: 55–65

- 62 Medioni G, Nevatia R. Matching images using linear features. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 1984, 6: 675–685
- 63 Cucka P, Rosenfeld A. Linear feature compatibility for pattern matching relaxation. Pattern Recogn, 1990, 23: 81–94
- 64 Su J, Lin X G, Liu D Z. A multi-sensor image registration algorithm based on structure feature edges. Acta Automat Sin, 2009, 35: 251–257
- 65 Wang W H, Chen Y C. Image registration by control points pairing using the invariant properties of line segments. Pattern Recogn Lett, 1997, 18: 269–281
- 66 Yang J, Qiu J, Wang Y F, et al. Feature-based image registration algorithm using invariant line moments. Acta Photonica Sin, 2003, 32: 1114–1117
- 67 Ou Y H, Fan D Z, Ji S, et al. Line matching based on discrete description and conjugate point constraint. Acta Geod Cartograph Sin, 2018, 47: 74–82
- 68 Liu G X, Liu D M, Liu F P, et al. A robust image registration algorithm based on feature points matching. Acta Opt Sin, 2008, 28: 455–461
- 69 An M, Jiang Z G. Fast downward-looking target matching technology on missile in large field of view. Syst Eng Electron, 2008, 30: 114–117
- 70 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. Int J Comput Vision, 2004, 60: 91–110
- 71 Bentoutou Y, Taleb N, Kpalma K, et al. An automatic image registration for applications in remote sensing. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2005, 43: 2127–2137
- 72 Alhichri H S, Kamel M. Virtual circles: a new set of features for fast image registration. Pattern Recogn Lett, 2003, 24: 1181–1190
- 73 Liu X J, Yang J, Ling J G, et al. Scene matching approach by increment sign correlation. Infrared Laser Eng, 2006, 35: 732–737
- 74 Tao T, Zhang Y. Detection and description of scale-invariant keypoints in log-polar space. J Image Graph, 2018, 20: 1639–1651
- 75 Li F Y. Application of non-uniform mapping transform technique in scene matching correlator. Dissertation for Ph.D. Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007
- 76 Fu G, Zhao H R, Li C, et al. A method by improved circular projection matching of tracking twisty road from remote sensing imagery. Acta Geodaet Cartograph Sin, 2014, 43: 724–730
- 77 Zhao F, Huang Q M, Gao W. Image matching by multiscale oriented corner correlation. In: Proceedings of the 7th Asian Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2006. 928–937
- 78 Qin Q, Chai Z H, Fu Y H, et al. Infrared scene matching based on ternary amplitude-phase filter. J Infrared Millimeter Waves, 2005, 24: 477–480
- 79 Wong L B, Tian Y, Wang Y Q, et al. Novel scene matching method for complex terrain based on three-view constraints. Acta Aeronaut Astronaut Sin, 2008, 29: 203–211
- 80 Qu Y, Guo X W, He P, et al. Matching extension based on colinearity and epipolar geometry constraint. Opt Tech, 2017, 43: 450–454
- 81 Wang Y M. A post-processing algorithm for continuous scene matching. J Astronaut, 2004, 25: 535–540
- 82 Wang K P, Shang Y, Yu Q F. An image matching approach based on the invariant moment of slope angle histogram. J Comput-Aided Design Comput Graph, 2016, 21: 389–393
- 83 Sjahputera O, Keller J M. Particle swarm over scene matching. In: Proceedings of Swarm Intelligence Sym-posium, 2005
- 84 Zhang Z J, Hao X Y, Liu S L, et al. Application of improved genetic algorithm in image pattern matching. J Geomat, 2013, 38: 52–53
- 85 Zhang Y S, Zhu Q, Wu B, et al. A hierarchical stereo line matching method based on a triangle constraint. Geomat Inf Sci Wuhan Univ, 2013, 38: 522–527
- 86 Zhang X C, Zeng P, Zhang Y S. Scene matching by dual-tree complex wavelet structural similarity measurement. Modern Defense Tech, 2017, 45: 87–92
- 87 Sun S Y, Zhang Y, Li J Z, et al. Two-dimensional location of aerial photography based on scene matching. Syst Eng Electron, 2018, 40: 2415–2419
- 88 Zhang W Y, Li Z, Wang Y J. UAV scene matching algorithm based on CenSurE-star feature. Chin J Sci Instrument, 2017, 38: 462–470

- 89 Jin Z, Wang X, Moran B, et al. Multi-region scene matching based localisation for autonomous vision navigation of UAVs. J Navigat, 2016, 69: 1215–1233
- 90 Ling Z G, Pan Q, Zhang S W, et al. A scene matching method with weighted hausdorff distance based on edge measure. J Astronaut, 2009, 30: 1633–1638

Review of scene matching visual navigation for unmanned aerial vehicles

Chunhui ZHAO^{1,2*}, Yihui ZHOU^{1,2}, Zhao LIN^{1,2}, Jinwen HU^{1,2} & Quan PAN^{1,2}

1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710000, China;

2. The Key Laboratory of Information Fusion Technology, Ministry of Education, Xi'an 710000, China

* Corresponding author. E-mail: zhaochunhui@nwpu.edu.cn

Abstract High precision location and navigation is one of the key techniques of autonomous flight, efficient reconnaissance, and precision strike of unmanned aerial vehicles (UAVs). Combined with inertial system, scene matching visual navigation technology can be used in a highly precise autonomous navigation system because of its simple structure, passive working mode, and high locating precision. Many previous studies on visual navigation systems of UAVs focus on extracting information of aircraft attitude and navigation using visual information, or the combination of the navigation system and IMU sensors. In China, numerous researches have focused on the technologies of the inertial-combined navigation, 3D map reconstruction with image or laser, and visual navigation landing application. In this study, we summarize the characteristics, categories, and analytical methods of scene matching visual navigation for UAVs. Then, we conclude the primary techniques in high precision, strong real-time, robust and continuous visual navigation tasks under different time, visual angle, illumination, resolution, platform, and sensor.

Keywords unmanned aerial vehicle, visual navigation, scene matching, image matching, inertial navigation



Chunhui ZHAO was born in 1973. He is a Ph.D. recipient and an Assistant Professor and a senior member of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. His current research interests include information fusing, color matching, image processing, and intelligent control.



Yihui ZHOU was born in 1994. She is an M.S. recipient and an Assistant Professor and a senior member of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Her current research interests include navigation and guidance.



Zhao LIN was born in 1995. He is an M.S. recipient and an Assistant Professor and a senior member of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. His current research interests include image processing.



Jinwen HU was born in 1983. He is a Ph.D. recipient and an Assistant Professor and a senior member of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. His current research interests include sensor network, multi-platform system, and multi-UAV network control.