无人机感知与规避: 概念、技术与系统

吕洋, 康童娜, 潘泉*, 赵春晖, 胡劲文

西北工业大学自动化学院, 西安 710072

* 通信作者. E-mail: quanpan@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2018-11-30; 接受日期: 2019-02-28; 网络出版日期: 2019-05-15

国家自然科学基金 (批准号: 61603303, 61473230) 资助项目

摘要 无人机感知与规避技术是实现未来无人机空域集成应用的核心技术之一, 也是无人机自主化、智能化的重要标志. 近年来无人机感知与规避相关政策法规、技术研究和系统设计都取得了大量的工作进展. 本文从无人机感知与规避的概念、核心技术和系统设计 3 个方面进行了综述. 针对无人机感知与规避的概念, 从政策法规和技术内涵两方面进行了介绍; 针对无人机的核心技术, 从无人机的环境感知、路径规划与机动技术两方面介绍了国内外代表性的工作进展; 在系统设计方面, 针对大、中型无人机和小、微型无人机在系统属性、应用场景和操作方式上的诸多差异分别提出了相应的感知与规避系统安全等级定义, 并分别给出了层级式和响应式的感知与规避系统架构. 最后, 从政策标准发展、技术研究和系统设计测试 3 个方面对无人机的感知与规避系统进行了展望.

关键词 无人机, 环境感知, 障碍规避, 路径规划, 机动控制

1 引言

近年来, 无人机系统 (unmanned aircraft system, UAS) 技术得到了飞速发展和广泛的研究应用. 在军事方面, 无人机已经成为信息化、网络化战场应用中的重要组成部分^[1]; 在民用应用方面, 无人机技术在遥感测绘^[2]、地质勘测^[3]、反恐^[4]、灾害救援^[5]等方面同样具有广泛的应用前景. 随着军民领域对无人机的需求日益强烈以及空域的进一步开放, 未来空域将日趋密集, 呈现无人机、有人机空域共享的复杂空中交通态势^[6]. 由于无人机系统在任务应用、操作方式等方面与现有的空中交通系统中的飞行器存在较大的差异, 现有的空管体系下的空中交通安全保障技术难以确保大量无人机应用后的空域安全. 无人机的操作方式决定其难以通过飞行员的看见并规避 (see and avoid) 实现安全保障, 而是必须具备自主的飞行空域的环境感知、碰撞威胁估计、规避路径规划与机动控制能力, 即无人机的感知与规避 (sense and avoid, SAA) 功能. 感知与规避技术是未来无人机空域集成应用的重要安全保障, 也是无人机自主化、智能化的核心标志之一^[7].

引用格式: 吕洋, 康童娜, 潘泉, 等. 无人机感知与规避: 概念、技术与系统. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 520–537, doi: 10.1360/N112018-00318
Lyu Y, Kang T N, Pan Q, et al. UAV sense and avoidance: concepts, technologies, and systems (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 520–537, doi: 10.1360/N112018-00318

相比于有人机的看见并规避功能^[8], 无人机系统的感知与规避功能依靠感知与规避智能算法设计以及传感器、平台、通信配置实现碰撞威胁的感知、评估和规避控制等功能, 具有更高的技术难度和更复杂的系统集成度. 其技术难度主要体现在以下3个方面. (1) 感知信息不精确. 在基于传感器信息进行目标检测和跟踪过程中, 传感器的属性对感知信息的精度、质量具有决定性作用. 无论是地基传感器还是空基传感器, 往往存在着量测信息不精确, 甚至信息缺失等问题. 感知信息不精确会大大增加态势理解和威胁评估的不确定性, 进而导致发生错误的规避决策和机动控制. (2) 遭遇模型不确定. 随着无人机的应用领域不断扩展, 飞行操作空域不断扩大, 无人机任务操作过程中与环境的交互将日趋复杂. 无人机的遭遇模型将由单平台-单目标的简单遭遇模型发展为多平台、有/无人机混合飞行中运动、静止等多种动态模型目标并存的复杂遭遇模型. 复杂的遭遇场景将大大增加无人机系统的态势感知与威胁评估难度, 降低其自主决策能力. (3) 机动规划多约束. 无人机感知与规避的路径规划控制受限于平台动态模型、飞行空间操作规则、碰撞威胁, 以及任务属性等多种约束. 在进行最优路径规划与机动控制的过程, 要充分考虑多种约束条件, 而这些条件往往表现为非凸、非线性等特点, 这无疑增加了机动规划优化过程的难度. 系统集成的复杂性体现在: (1) 无人机感知与规避系统配置. 无人机的感知与规避系统设计需充分考虑无人机的平台属性、传感器的功能特点, 以及相关的政策法规和监管规则进行传感器选择参数优化和安装设计, 以达到与有人机“看见并规避”等价安全 (equivalent level of safety, ELOS) 的环境感知能力; (2) 在未来空域共享飞行过程中, 无人机感知与规避系统需通过合适的操作规程和技术手段实现与现有的空中交通管理系统的有效交互, 从而实现空域集成和共享的目的.

本文针对无人机感知与规避基础概念、技术研究与系统设计进行了综述. 首先, 第2节从政策需求和技术内涵两个角度对无人机感知与规避的概念进行了描述, 在此基础上第3节介绍了无人机的核心技术, 即环境感知技术和路径规划与规避机动控制技术. 考虑大、中型无人机和小、微型无人机在平台系统属性、应用场景和操作方式上的诸多差异, 第4节有针对性的分别提出了大、中型无人机和小、微型无人机的感知与规避系统的安全定义和系统架构. 最后在第5节对无人机感知与规避技术和系统进行了展望.

2 无人机感知与规避概念

无人机感知与规避的概念可从政策法规和技术功能两个角度进行定义: 从政策法规角度, 无人机感知与规避的概念源自于有人飞行器的“看见并规避”功能. 1968年, 美国联邦航空局 (FAA) 在 FAR 91.113^[7] 中提出, “... 在气象条件允许的情况下, 无论在视距飞行规则下或者仪表飞行规则下, 飞行操作人员需保持警觉, 实现看见并规避其他飞行器的功能 ...”. FAA 认为无人机空域飞行的前提是能够实现与有人驾驶飞行器等价安全的飞行能力, 即感知与规避功能, 其中主要包括空中交通自动分离和碰撞规避功能. 包括美国联邦航空局、美国国防部和欧盟航空安全署均对感知与规避进行了类似定义:

• ... SAA 是一种保持与其他空中交通分离和碰撞规避的能力, ..., 用以达到 see and avoid 的功能要求 ...

——《2007~2032年无人机路线图》^[9]

• ... SAA 为无人机提供自分离和碰撞规避功能, 保障与有人机 see and avoid 操作类似的等价安全飞行 ...

——《民用无人机空域集成路线图》^[6]

图 1 (网络版彩图) 无人机感知与规避技术功能分解

Figure 1 (Color online) SAA function flow

• ... 有人机飞行员需遵守 see and avoid 功能, 与之对应, 无人机需遵守相似的 “sense and avoid” 功能 ...

—— 欧洲空管局 [10]

从技术角度, 无人机的感知与规避功能是指无人机系统通过传感器、数据链路和地理信息数据等实现对空中交通环境的有效观测、评估和威胁判断, 在此基础上, 针对可能的碰撞威胁生成有效的规避路径和机动控制, 从而实现碰撞规避和保障空域交通安全^[11] (如图 1). 具体功能包括:

- **检测与跟踪.** 实现空间环境感知的第 1 步, 利用各种机载传感器或各类通信链路对空间环境进行量测, 对各类潜在障碍物进行检测和状态估计. 常见的感知设备包括各种非合作机载传感器, 包括光电、雷达、声波等以及合作式的通信链路, 如空中防撞系统 (traffic collision avoidance system, TCAS)^[12]、广播式自动相关监视 (automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)^[13] 等. 主要的感知目标包括飞行空域的各类合作/非合作动态目标以及各类静止障碍物.

- **威胁评估.** 通过有效的状态估计和空间遭遇建模, 对飞行态势进行理解分析, 根据空间分离规则和本机状态对碰撞威胁程度进行评估; 在复杂的空间环境中, 飞行空间的遭遇场景包括多种障碍物 (静态/动态) 和多种遭遇模型 (单机/多机). 威胁评估的主要指标包括碰撞概率 (collision probability)^[14]、最小分离距离 (closest point of approach, CPA)^[15] 和碰撞预留时间 (time to collision, TTC)^[16].

- **规避决策与路径规划.** 结合威胁评估结果, 通过人在回路 (man in the loop) 或自主 (autonomous) 方式生成碰撞规避决策. 结合平台属性、飞行规则、障碍威胁属性等生成最优规避路径.

- **规避机动控制.** 感知与规避的最终输出. 根据规避机动决策和路径规划结果, 控制器计算控制输出实现规避路径跟随和应急机动.

上述功能模块描述了无人机感知与规避的完整过程, 通常该过程为串联执行的关系, 即感知与规避的预留时间 T 由检测与跟踪过程 T_{det} 、威胁评估时间 T_{dm} 、路径规划 T_{pp} 和规避机动控制 T_{pf} 过程组成. 然而在实际的系统中, 由于平台的功能特点和任务属性的不同, 感知规避包含的功能模块和相关的功能时序也可能不同.

无人机感知与规避技术是一项技术与政策规则发展相辅相成协同发展的技术. 一方面无人机感知与规避相关的技术发展具有鲜明的政策、标准导向性, 即无人机的系统配置、通信、感知规避操作等要遵守相关的航空法规、设计参考、适航标准和操作准则^[17]. 另一方面, 感知与规避技术研究能够促进相关航空政策标准的改革, 即新平台、新技术、高自主的空中交通形态, 必然会带来空中交通管

图 2 无人机空域环境感知技术

Figure 2 UAV SAA environment sensing technology

理手段、操作标准的革新和政策法规的变化. 通过技术与政策标准的相互迭代发展, 共同促进无人机空域集成应用和保障空域飞行安全.

3 无人机感知与规避关键技术

3.1 无人机空域环境感知技术

无人机感知与规避技术中的空域环境感知是指无人机基于搭载的机载传感器或数据链路完成对飞行空间的各类静止/运动、合作/非合作目标的检测和状态获取, 对环境态势和碰撞威胁程度进行评估. 无人机空域环境感知技术研究的主要内容包括: 根据传感器属性、无人机平台属性和操作空域相关的规则标准进行最优的感知资源配置, 在此基础上, 针对无人机复杂空间操作环境和气象条件设计目标检测、跟踪、识别算法, 实现精确、稳定的目标状态获取和可靠的态势感知和威胁评估. 同时, 感知算法性能也可反向指导感知资源的优化配置, 从而达到系统级的最优感知性能, 如图 2 所示.

3.1.1 感知与规避传感器配置

传感器属性主要包括传感器工作位置 (地基、机载), 传感器工作方式 (合作/非合作, 主动/被动), 传感器感知数据属性 (测距、测向) 和作用范围 (VMC (visual meteorological condition)、IMC (instrumental meteorological condition)、全天候). 除此之外传感器的载荷安装要求和成本也是进行传感器选型的重要依据. 决定无人机感知传感器的另一个重要因素是无人机的平台属性, 考虑不同的无人机类型的载荷能力和操作方式各不相同, 其搭载的传感器必须满足无人机平台相应的属性需求. 除此之外, 无人机的空域集成过程中必须严格遵守相应飞行空间的政策法规和空间飞行规则, 才能保障空域的飞行安全. 无人机的传感器配置应充分体现政策法规中规定的各项功能, 达到与有人机等价飞行安全的能力. 例如在 ASTM F2411 标准中定义了感知与规避的视场范围为: 水平 $\pm 110^\circ$, 俯仰 $\pm 15^\circ$ [18], 则进行传感器配置的过程应考虑上述要求.

基于各类传感器属性、平台属性和航空规则, 可最终得到如表 1 的无人机感知与规避传感器配置. 其中大型无人机的飞行空间与有人机类似, 处于空管雷达等地面空中交通管理系统的感知范围内; 且载荷能力决定其可搭载大型的雷达、T-CAS 等环境感知设备完成大范围的环境感知. 与之相反, 对于小、微型无人机, 其飞行空间决定其无法通过现有的空管系统完成监管, 只能处于视距下进行飞行. 其低载荷能力决定其只能搭载近距离的相对量测传感器, 如光学、红外和超声波等低成本、低质量、低

表 1 无人机感知与规避传感器配置^{a)}
Table 1 UAV SAA sensor configuration

Platform	T-CAS	ADS-B	Ground radar	Airborne radar	Lidar	Man eye	EO	IR	IRST	Ultra-Sonic	Stereo	MWR
HALE	√ *	√ *	√ *	√			√	√	√			
MALE	√ *	√ *	√ *	√			√	√	√			
TUAV		√ *	√		√		√	√				√
SUAV		√ *			√		√	√			√	√
MAV		√ *			√	√ *	√	√		√	√	√

a) √ represents the sensor applicable to the UAV; * represents the sensors that should be mounted according to the policies and regulations in the future application of UAV.

功耗的感知传感器.

3.1.2 无人机空域目标感知算法

感知算法的目的是通过对传感器数据的处理, 实现对目标的检测和状态估计. 考虑到不同的传感器在作用原理的不同, 其提供的数据形式和精度也不同, 因此所采用的数据处理方法也不尽相同. 在复杂的无人机任务环境和气象条件下进行目标的检测、跟踪、识别, 实现精确、稳定的目标状态获取和可靠的态势感知和威胁评估是无人机环境感知的主要挑战, 特别是针对非合作目标的感知存在传感器量测非线性、信息不完备和不精确等问题.

在合作式感知过程中, T-CAS 或 ADS-B 等数据链路可精确地获得目标的运动状态. 如 T-CAS 系统能够获得高精度的目标的相对距离、相对方位和高度^[12], 而 ADS-B 能够获得目标的绝对经纬高信息, 精度取决于目标的导航系统精度^[19]. 基于该信息, 可直接进行威胁评估和碰撞预测.

在非合作环境感知过程中, 无人机搭载的常用非合作目标感知设备包括雷达^[20~23]、激光雷达^[24]、超声波^[25]等主动感知设备以及光电、红外等被动感知设备. 雷达传感器是大、中型无人机的主要感知设备. 无人机通过搭载雷达传感器能够获得含有噪声的目标深度和角度量测. 在此基础上, 通过估计理论和方法, 得到目标的状态估计, 进而实现威胁评估和碰撞告警. Accardo 等^[20]描述了一种基于雷达的 SAA 系统, 通过 Kalman 滤波方法实现对目标飞行器的状态估计, 并通过有人机的飞行测试证明了其算法的有效性. Owen 等^[21]设计了一种适用于大、中型无人机感知与规避任务的雷达系统, 并通过提取信号特征和误差精度分析验证了该雷达的空域目标感知能力. Newmeyer 等^[22]设计了一种适用于小型无人机的毫米波雷达 (millimeter wave radar, MWR) 空域感知系统, 通过一系列的信号处理方法获得目标的距离和方位角度后, 用 RANSAC 方法实现对目标的跟踪. 光电/红外传感器体积小、重量轻、被动感知的特点使其适用于多种无人机的空域感知场景. 大、中型无人机方面, 视觉感知需实现对远距离目标的有效感知, 此时目标体现为低对比度、无结构特征的小目标图像点簇, 其主要挑战是实现图像坐标下的目标的稳定的检测和跟踪. Dey 等^[26]采用形态学滤波、构建形状描述算子、SVM 目标分类和图像目标跟踪等过程实现远距离目标的有效感知. Lai 等^[27]提出了一种机载视觉碰撞检测系统, 结合 CMO 形态学滤波和 HMM、Viterbi 时间滤波器方法实现对 400~900 m 范围内空中飞行目标的有效检测. 在小、微型无人机视觉感知中, 感知场景复杂, 目标为低空的静、动态慢速目标. 实现低空视觉感知的主要挑战是实现复杂场景中的障碍物提取和精确定位. Song 等^[28]采用光流方法实现对静态目标的深度估计和动态障碍物的碰撞时间的估计. Mori 等^[29]通过检测障碍物在图像坐标下的相对尺寸变化实现对障碍物的深度定位. 此外, SLAM 方法^[30]、立体视觉方法^[31]等通

表 2 全局路径规划与局部响应碰撞规避
Table 2 Global path planning & reactive collision avoidance

	Global path planning	Reactive collision avoidance
Platform	HALE & MALE UAV	Small & micro UAV
Operation space	Sparse mid-air scenario	Complex low-altitude scenario
Sensing information	Global, wide range target status	Local, limited range target measurements
Control output	Global way-points	Local control command
Sensing & control	Almost decoupled	Coupled
Loop frequency	Low	High

过生成结构环境三维点云实现对障碍物的有效定位.

3.2 无人机路径规划与机动控制技术

路径规划需求最早来源于民航客机经济性以及军事行动中飞行器躲避地面雷达要求. 相比有人机, 面向未来空域集成的无人机的路径规划更具挑战性, 如平台约束、感知信息不确定性、4D 航路管理、智能化、自主化任务需求使得航路规划变为一种多约束、多目标的优化问题. 根据平台的属性不同, 无人机的规避行为可分为全局路径规划 (global path plan) 和响应式规避控制 (reactive collision avoid) 两种. 两者的主要区别如表 2.

3.2.1 全局路径规划方法

在基于全局路径规划方法中, 所有的感知信息需转换至统一的全局坐标中, 此时, 通过优化全局目标函数进行规避路径重规划实现碰撞规避. 在全局路径规划过程中无人机应遵守所在飞行空域的相关航空法规和操作规程. 基于全局的路径分离方法高度依赖飞行空间环境状态信息, 即无人机的感知系统需具备大范围、高精度的感知能力和稳定可靠的空中交通信息支持. 常见的全局规划算法包括如下:

状态空间搜索方法. 通过将飞行空间进行状态定义, 并在给定的目标函数下, 对操作空间进行搜索, 求得最优的状态合集, 即为目标优化路径. A* 算法是一类分支定界的路径搜索优化的算法. 通过将飞行空间网格划分, 并通过节点表示本机、目标的状态信息, 如文献 [32,33]. A* 算法中目标函数的建立包含节点路径代价和预估启发代价. 在障碍规避应用 [34] 中, 该目标函数通常指节点规避路径代价和规避碰撞风险代价, 通过全局搜索获取最优规避路径. A* 算法理论上能够优化得到最优路径, 但其计算和内存消耗随着节点数的增加呈指数上升, 且作为一种静态空间搜索方法, 不适用于动态空间的路径规划问题. 另外一种空间搜索方法是快速随机搜索树 (RRT) 方法, 能够实现快速、有效的高维空间路径搜索. 其原理是从初始结点开始, 通过随机空间采样进行树结点扩展, 并最终实现零规划. 其随机性选择结点的方式决定了其优化性能难以保证. 文献 [10,35~37] 利用改进的 RRT 算法实现了规避路径规划. 在文献 [37] 中, Lin 等通过 Close-Loop RRT, 将闭环路机动控制与 RRT 路径搜索相结合, 通过闭环机动控制飞行轨迹预测实现更小的预测误差和碰撞风险, 并且路径规划中考虑了目标的机动约束.

遗传/进化算法. 遗传算法是模仿达尔文自然选择理论进行寻优的方法. 通过将状态空间变量被定义为染色体上的基因, 并模仿繁衍、杂交、突变等基因操作实现优化搜索 [38~40]. Tu 等 [38] 利用 GA (gene algorithm) 实现静止/运动环境下的规避路径规划, 通过可变染色体长度实现最小碰撞威胁和最

少路径消耗. Durand 等^[39]利用遗传算法训练神经网络, 用于飞行发生碰撞威胁时的快速优化路径解算. 然而遗传算法在复杂的环境下对计算性能要求较高; 另外算法易陷入极小值.

群优化算法. 群优化算法中蚁群优化算法 (ant colony optimization, ACO) 是一类模仿蚂蚁觅食规律的仿生算法, 通过不断增强备选最优路径信息素的方式得到最优路径^[41~43]. Duan 等^[41]设计了一种自适应上下界的 ACO 算法, 通过重规划路径实现对静态、动态和随机障碍物的规避. 与之类似, 在文献^[42]中, Liu 等将 ACO 扩展至多智能体的障碍规避中. 粒子群优化算法 (particle swarm optimization) 是一类基于是一类模仿鱼和鸟的集群飞行行为的路径规划方法. 通过设计目标函数评价粒子的位置, 并通过不断移动优化粒子达到路径寻优的目的. 在文献^[43]中, 通过设计关于目标位置和障碍位置的优化函数, 实现障碍规避. 算法能够实现对静态和动态环境中的多平台协同规避. 但其缺点是易陷入极小值, 是一种次优路径优化方法.

其他的全局规划算法包括混合整数线性规划^[44]、非线性规划^[45,46]等.

3.2.2 局部响应式碰撞规避控制方法

反应式碰撞规避应用于感知信息有限, 对环境、目标模型不能精确全局建模的情况下的一种保守的碰撞消减算法. 通过应用局部、有限的信息, 算法实现对下一步动作的解算. 因此, 反应式算法能够有效地应用于高动态、环境随机的碰撞规避, 且计算代价较小. 但算法的优化效果相比于全局算法较差.

势场法. 人工势场法 (artificial potential field, APF) 利用原子的吸引、排斥原理定义平台与空间环境的状态关系. 通过将目标路径定义为引力函数, 将障碍定义为斥力函数, 可应用于障碍规避场景中, 如文献^[47,48]. 文献^[48]中利用 APF 方法, 设计目标引力与障碍斥力函数, 确定平台的飞行方向和速度, 实现实时的规避路径规划. 由于 APF 方法的计算仅仅依靠当前平台位置与空间环境关系进行机动确定的贪婪算法, APF 方法通常比其他方法运算更加高效, 但易陷入局部极小值和震荡中, 不适用于全局的路径规划. 针对局部极小值问题, 有很多研究工作对其进行了改进. 与之类似的方法还包括虚拟力方法^[49]等.

模糊逻辑. 模糊逻辑方法通过设计模糊化规则方式定义环境与决策确定关系. 许多研究工作将模糊逻辑控制引入到系统控制与障碍规避中. Dong 等^[49]通过建立目标 - 本机相对位置与本机速度、偏航的模糊逻辑规则, 完成障碍规避的功能. Lin 等^[37]利用本机与障碍物的位置以及碰撞概率确定本机机动. 模糊逻辑方法能够在具有大量环境不确定情况下进行决策判断和机动控制, 但其高度依赖于规则的确定, 在真实的未知环境中, 难以获得理想的模糊规则. 文献^[50]介绍了一种在未知环境中基于模糊逻辑的移动机器人行为控制方法, 通过多个行为如避障边沿行走和目标导向的融合, 能够有效地实现机器在复杂和未知环境中的导航.

几何法. 几何法是避撞路径规划中最为常用的方法, 直接利用空间几何关系描述本机与环境的状态关系, 实现直观、高效的路径解算, 如比例导航 (proportional navigation)^[51]、最近碰撞点 (point of closest approach, PCA)^[52]、碰撞核 (collision cone) 方法^[53]等. 上述算法的基本原理是利用本机与障碍物的速度确定是否存在碰撞, 当碰撞存在时, 通过调整飞行方向实现碰撞威胁最小. 文献^[54]中将几何法扩展至 3 维空间的多机协同规避问题. 文献^[55]将几何方法进行碰撞威胁评估与 Dubins 路径规划方法结合, 基于正切圆角和直线进行碰撞路径设计, 实现多无人机路碰撞路径规划. 几何法基于已知局部信息进行几何解算, 难以保证路径的全局优化性能.

强化学习方法. 强化学习是一种实现机器人控制的通用数学框架, 在这个框架中, 通过学习如何将情境映射到行动, 从而使数字奖励信号最大化^[56~63]. 在无人机的感知与规避过程中, 通过将感知

数据映射至规避控制空间,从而保证无人机的飞行安全性能最大化. La 等^[57]提出了一种基于强化学习的障碍物/捕食者规避方法,通过将高层的 Q-learning 决策过程与低级的无人机集群控制结合,实现了对障碍物的有效规避. 在其后续的成果中^[58],完全基于 Q-learning 方法实现了障碍规避功能,其中碰撞规避功能被建模为一项激励函数. 在 Long 等^[59]基于深度强化学习方法,构建深度神经网络模仿基于几何关系的障碍规避方法 ORCA^[60]从而实现在多智能体设置下的碰撞规避. 在文献^[61]提出的类似的深度强化学习框架中,通过对学习策略和激励函数的改进,实现了比 ORCA 更好的规避性能. Lyu 等^[62]基于集中式的强化学习框架和分布式的控制策略大大提高了强化学习的效率.

4 无人机感知与规避系统

4.1 大、中型无人机感知与规避系统

4.1.1 大、中型无人机感知与规避系统安全概念

在大、中型无人机系统的应用场景中,无人机的应用空域和飞行特性与有人飞行器极为相似,即在现有的空中交通系统体系下进行任务操作,并遵守相关空域的政策法规和空域管理规则与流程,实现与有人飞行器等价飞行安全的能力. 考虑大、中型无人机在大部分的应用场景中需要与有人飞行器进行空域共享,与现有的空中交通系统进行信息交互,因此在大、中型无人机的系统设计过程中,应充分利用现有的空中交通系统的各类成熟的体系、技术和功能支持,并考虑无人机系统应用可能带来的安全威胁.

感知. 考虑大、中型无人机的高价值、高可靠性需求和复杂应用环境挑战,综合大、中型无人机的载荷能力和功能需求,其感知过程需具备大范围、持续稳定、精确的特点. 通过结合多种感知信源、通讯链路和信息支援,可为后续的任务实现和无人机的空域飞行安全提供支持. 在此过程中,通常包含大量的复杂传感器数据处理与信息交互,在保证感知可靠的前提下,适当程度的使用自动化流程和智能化数据处理方法能够极大地提高无人机系统的数据处理系统速度和信息提取精度,从而提高无人机系统的任务效率. 然而在自主感知技术手段满足大、中型无人机感知的安全可靠飞行之前,无人机系统仍需要人在回路的感知功能,从初级的感知信息实时监测到高级别任务层的状态监督等. 特别的,在当前阶段,无人机的感知功能要求针对感知与规避任务中无人机系统获取传感器数据、导航信息和空中交通状态等各类飞行航路环境信息,通过特征提取、目标检测跟踪识别等方法获得潜在的合作式/非合作式目标、气象等安全威胁,辅助完成威胁告警功能.

决策. 在大、中型无人机的任务实施过程中,需要综合多种信息,包括任务需求、感知信息、通讯链路、空管信息等实现面向任务的判断、优先级排序和无人机的行为决策等. 在制定无人机的决策逻辑过程中应充分遵循现有的空中交通系统中的相关政策法规和操作程序,最终形成稳定可靠的无人机的飞行操作程序和决策规则,且在该规则下,无人机应具备与有人机机组等价飞行安全的能力. 相比于有人机系统在空管系统辅助下实现的人在回路的决策功能,无人机应具备更大的自主化水平,即实现人在回路监督功能下的分析、评估和有限决策逻辑下的自主决策等. 然而,针对大、中型无人机任务操作中的全自主决策功能仍需进一步的算法研究以及长期性能测试.

控制. 控制大、中型无人机系统需具备完善的飞行控制器系统,能够实现对空中交通系统、任务指令的有效响应,同时具备挑战环境下的安全、稳定的飞行保障和故障诊断隔离功能. 相比于人在回路的遥控驾驶方式,自动驾驶仪 (autopilot) 的应用极大地提高了无人机驾驶的控制精度和飞行可靠性,

表 3 大、中型无人机飞行安全能力等级划分
Table 3 Large & middle size UAV safety capacity level

Safety level	Description
0	Does not have any security assurance capability and technical means
1	Local flight safety support under specific mission functions include: (a) limited perception ability and partial communication ability in VMC environment; (b) decision rules and operation methods in simple task environment; (c) and simple flight control operation method and command realization.
2	Wide range and long endurance flight safety support in a simple and sparse flight environment: (a) wide range sensing and multi-link communication capabilities in a VMC condition; (b) situation assessment and decision making in a wide range of mission environments; (c) and fully controllable task execution.
3	Safety flight insurance in complex meteorological conditions and flight environment: (a) perception ability and communication link under VMC and IMC; (b) environmental situation analysis and fault diagnosis under complex flight conditions; (c) and controllable task instruction execution under man's supervision function.
4	All-weather flight safety support under complex air traffic control system: (a) large-scale perception and cooperative air traffic information under VMC and IMC; (b) multi-information support for flight situation analysis and platform health management functions; (c) and access to ATC system, complete flight status acquisition and flight command execution.
5	Equivalent safe flight in shared airspace with man-machine: (a) large-scale perception and highly reliable information interaction under VMC and IMC; (b) highly reliable situation analysis and decision-making punder the support of multiple information sources (more than people in the loop); (c) and seamless access to the ATM (air traffic management) system to achieve the mission flight under the ATC operating rules.

通过优化的路径规划、跟踪功能, 无人机能够在极少的人员干预的情况下完成任务飞行. 面向未来的大、中型无人机的控制系统应具备完全自主的飞行控制系统, 具备在空管体系下的自主飞行能力. 基于无人机感知、决策和控制的能力水平, 可对大、中型无人机的应用安全能力进行划分, 如表 3.

4.1.2 大、中型无人机感知与规避系统设计参考

针对上述大、中型无人机的安全飞行的功能描述与等级划分, 大、中型无人机的感知与规避功能实现, 是在现有的空管体系下基于空中交通信息支持实现无人机的潜在碰撞威胁消减. 结合大、中型无人机的任务功能需求和飞行特点, 可进行如图 3 的分层感知与规避功能架构. 参考机器人的层次化模型 (hierarchical paradigm) [64] 采用分层的感知与规避流程, 即分为信息感知、路径规划与机动控制 3 个层次. 首先, 考虑大、中型无人机的任务操作和飞行空间大多定义为全局坐标体系下, 如经纬高坐标, 因此在感知层面, 用于规避控制任务的数据并不仅仅决定于机载传感器的相对感知信息, 而需要融合包括地理信息系统、地面信息支持和空中交通控制系统的信息, 在此需要单独的感知环节将所有的信息融合并转换至全局坐标系下; 其次在空域集成的情况下, 无人机的规避需要满足相关政策法规的规则和程序, 并与空中交通管制系统和地面人员进行信息交互与决策. 在整个规划过程中包括威胁声

图 3 (网络版彩图) 大、中型无人机层次式感知与规避系统框架

Figure 3 (Color online) The hierarchical SAA paradigm for large & middle size UAV

明报告、规避决策、规避路径规划、规避指令下达等标准流程。因此,大、中型无人机的感知与规避过程中除了机载的感知数据有控制决策逻辑外,还有大量的外部信源和决策支持,因此很难形成完全自主的闭环感知与控制结构框架,而是更加适合通过分层次、模块化、以时间轴为基准的层级结构执行。

在感知阶段,无人机通过搭载的大型感知设备,如 T-CAS, ADS-B 等合作式感知设备以及雷达、光电等非合作感知设备的感知配置 S 通过观测模型 g 得到目标的量测 y_k , 通过信息融合方法实现对目标的状态估计 $x_{o,k}$ 。大、中型无人机的感知需保证远距离、高精度的目标感知,以保证足够的碰撞预留时间 (time to collision, TTC); 在规划阶段,无人机的规避需遵循相关空域的法律和规程、空中交通管制 (air traffic control, ATC) 指令和地面控制端 (ground control system, GCS) 指令,如航路优先权、最小分离距离 d 等,综合多种信息后,给出规划的路径 $x_{i,k+1}^p$ 。在控制阶段,无人机通过对给定的参考路径 $x_{i,k+1}^p$ 的跟踪,实现对潜在威胁目标规避的最优控制 $u_{i,k}$ 输出。

目前,大、中型无人机的感知与规避系统得到了广泛的研究和初步的实验应用。作为一种“近期可实现”的感知与规避系统^[11],地基感知与规避系统依靠现有的地基雷达系统和空中交通管理系统能够使无人机在有限的空域范围内具备感知与规避能力。美国率先启动了地基感知与规避系统的研究,基于其完善的地基雷达系统建设和空管系统,美国空军在 2013 年完成了地基感知与规避系统的技术开发并进行了演示验证;2014 年 11 月,地基感知与规避系统开始在美国军无人机基地列装应用^[65]。尽管良好的技术和系统建设为无人机的感知与规避提供了基础,但是现有的地基感知与规避系统受限于雷达的通讯距离,覆盖区域的限制,只能在特定航路和飞机进出场区域实现对无人机的有效感知。

相比于地基感知与规避系统,机载感知与规避系统是基于机载的传感器、数据链路,以及机上实时数据处理系统完成环境感知、威胁分析、路径规划和机动控制等功能。机载感知与规避技术不依赖地面信息支持,能够独立自主完成感知与规避任务,是无人机自主化、智能化的重要标志。多个组织和研究机构进行了多种信源,如合作式 T-CAS, ADS-B 以及非合作的雷达、光学以及融合信息等的感知与规避系统研制和测试。2006 年,MIT 林肯实验室联合 MITRE 公司基于美国空军和 FAA 对全球鹰无人机的感知能力需求完成无人机机载 T-CAS II 的感知与规避测试,对遭遇模型、碰撞风险、飞行特性、故障诊断程序进行了仿真分析和原理验证^[12]。其最大缺点是体积、重量较大,无法在体积、载荷能力有限的无人机系统进行安装应用。2013 年 4 月, R^3 公司成功进行了基于 ADS-B 的无人机感知与规避系统的演示验证,通过 Tiger Shark 无人机搭载该系统,成功地实现自主的碰撞规避功能^[13]。雷达传感器是大、中型无人机的主要感知设备之一,MIT 林肯实验室专门为全球鹰无人机研制开发了感知与规避雷达系统^[21],Carnegie Mellon University 在 2011 年设计了一种基于激光雷达的感知与控制

系统, 实现全尺寸的无人直升机的复杂环境导航和障碍规避功能^[66]. 光学传感器是机器人系统的主要传感器之一, 因其体积、重量、功耗、被动感知等优势, 能够提供复杂环境下丰富的纹理、结构和光强度信息, 适用于各种类别的无人机系统. 2004 年, DRA 与 AFRL 联合研发了一种基于视觉的 SAA 系统^[67], 用于实时检测、跟踪入侵飞机的算法验证, 以及碰撞场景数据收集. CMU 在一份视觉 SAA 的报告^[24]中, 针对多种相机的视场、分辨率, 检测范围做出了详细的对比分析. Zarandy 等^[68]建立了一种基于多相机阵列的空中目标感知系统, 利用多个相机的拼接视场满足 SAA 的视场性能要求, 并通过 FPGA 实现多路并行相机数据的实时处理. ARCAA 在文献^[27]中提出了一种适用于固定翼无人机的视觉障碍检测系统, 通过 GPU 并行加速实现 CMO 图像滤波器和 HMM 滤波器的实时运行 (30 Hz). 并通过实验飞行验证了其算法的有效性. 由于单一的传感器工作特性、数据类型各不相同, 在实际应用场景上存在诸多限制, 综合利用多种传感器实现基于多源信息融合的感知与规避能够极大提高感知精度和规避可靠性. GA-ASI^[69]在 2013 年完成了一项基于多源信息融合的感知与规避系统, 利用 ADS-B, T-CAS, due-regard radar 信息进行融合碰撞预估和显示, 系统测试证明了其多源信息融合 SAA 系统在威胁检测、系统可靠性方面的优势. Fasano 等在文献^[14]中设计描述了一种融合光学、雷达传感器的全自主无人机防撞系统, 并对信息融合目标检测、多信源综合决策、机动控制等方面进行了说明, 仿真和实验证实了其算法和系统的有效性. 基于多源信息融合 SAA 系统结构、数据处理、传输复杂, 存在着包括软、硬件等多种应用挑战需要解决.

4.2 小、微型无人机感知与规避系统

4.2.1 小、微型无人机感知与规避系统安全概念

与大、中型无人机比较, 小、微型无人机的飞行器特点, 任务功能需求完全不同, 因此其飞行安全需求与也不同. 小、微型无人机体积小、重量轻, 难以搭载大型的感知设备进行大范围的环境感知; 其飞行空间通常在密集的近地场景中, 多种安全威胁并存; 小型无人机的应用难以通过现有的空中交通系统监管和获得空中交通信息系统支持, 其主要依靠视距内的操作人员和飞行器自身携带设备保障飞行安全. 因此, 小、微型无人机安全系统设计的过程中应充分利用多种感知设备和操作方式, 通过感知算法和控制器设计, 保证小、微型无人机在近地场景中形成安全保障能力. 在小、微型无人机系统的应用中, 任务的复杂程度的不断提高, 这就要求无人机具备更高的系统响应速度和控制精度, 而人在回路的视距内的飞行方式逐渐不能满足复杂的任务需求, 此时要求无人机系统具备更高的自主性以及自主系统下的安全保障能力.

感知. 小、微型无人机的应用过程中, 感知任务需完成局部飞行空间的快速、精细的感知. 在近地场景中, 无人机与环境需进行近距离的、频繁的交互, 这就需要无人机对环境具备连续的、精确的感知能力. 即对静止飞行环境的有效定位和动态目标的检测、跟踪. 并且在小型无人机系统中该功能的实现将更多的依靠机载的各类传感器和处理器. 有限的感知与计算资源将给小型无人机系统的可靠感知带来一定的挑战.

规划. 小、微型无人机在任务应用当中无人机需要实时的与环境进行交互, 这就需要无人机具备频繁的决策功能. 这种决策功能通常依赖实时的信息感知功能实现短时的预测、评估和指令生成. 因此, 相比于大、中型无人机的预测功能, 自主的决策功能能够极大地提高无人机系统的任务效率和安全飞行能力.

控制. 小、微型无人机的飞行过程中, 有限的感知和通讯距离要求无人机具备快速的反应能力和精确的机动能力. 优化的控制器设计能够极大地提高无人机系统的任务效率和安全性能. 针对与无人

表 4 小、微型无人机飞行安全能力等级划分
Table 4 Small & micro UAV safety capacity level

Safety level	Description
0	Visual line of sight flight with man in the loop remote control (100% man in the loop).
1	Partial perception and auxiliary control functions: (a) auxiliary navigation and environment perception in sparse environment; (b) low level auxiliary judgment and warning ability; (c) and people in the loop control, with auxiliary functions of the automatic driving system.
2	Man in the loop decision making (partial man in the loop): (a) auxiliary navigation, environment and target modeling in dense environment; (b) auxiliary decision-making function and safety warning ability; (c) man in the loop path planning and maneuver control.
3	Automatic mission execution with man in the loop supervision: (a) reliable navigation and data processing in the task environment; (b) supervised online data analysis and decision-making function; (c) online path planning and control.
4	Autonomous task execution: (a) intelligent information processing and environmental perception; (b) autonomous analysis and decision-making function; (c) optimal online path planning and maneuver control.
5	Collaborative task execution ability with multiple platforms: (a) multi-platform collaborative perception and data analysis; (b) collaborative situational awareness and decision-making; (c) distributed multi-platform path planning and control.

机的感知与规避问题, 相比于大型无人机系统的长时路径规划和平滑的机动控制方法, 小型无人机系统需要在突发的威胁情况下具备快速的响应能力, 这种响应能力通常需要感知环节与控制环节紧密耦合, 基于感知信息属性进行控制器设计. 基于无人机感知、决策和控制的能力水平, 可对小、微型无人机的应用安全能力进行划分, 如表 4.

4.2.2 小、微型无人机感知与规避系统设计参考

小、微型无人机应用于低空、复杂局部环境下的任务操作, 相比于大型机的丰富地面支持和空中交通管制介入的情况, 小、微型无人机由于感知范围有限, 飞行空间环境复杂, 各种属性的威胁目标繁多, 需要频繁进行机动实现障碍规避, 以达到更高的时效性和自主性, 因此基于串行时序的感知与规避技术难以适用于小、微型无人机中. 基于此, 针对小型无人机的感知与规避系统建立如图 4 的响应式技术流程.

参考机器人系统中的响应式框架 (the reactive paradigm), 小、微型无人机的感知规避技术中的感知环境获得感知信息直接输入控制器完成对无人机感知与规避的控制. 在如图 4 的框架中, 响应式框架通过将小、微型无人机的感知与规避功理解为生物的一系列行为. 在感知阶段, 通过传感器实现对环境的感知, 实现环境状态空间到感知量测空间的映射; 在控制阶段, 通过基于联合的控制设计, 模仿生物行为中由感知到行为动作的映射. 在反应式的框架中, 感知与控制高度耦合保证其规避机动控制

图 4 (网络版彩图) 小、微型无人机感知与规避响应式系统框架
Figure 4 (Color online) The reactive SAA paradigm for small & micro size UAV

的实时性。

在复杂的低空任务操作环境中, 环境的感知主要通过无人机平台搭载的各类相对量测传感器实现, 考虑无人机的小范围、局部应用的特点, 因此不需要针对传感器信息进行全局的环境地图建模, 而是以机体坐标系为中心的本地坐标系下进行环境量测信息建模; 在低速、低空环境中, 无人机的碰撞威胁主要包括同样的小、慢空中目标以及地面各类静止目标, 相比于复杂冗长的路径规划过程, 无人机可通过视觉伺服控制器^[70]、深度强化学习^[71]等方法基于传感器量测信息进行控制器设计, 执行控制输出, 完成障碍规避控制。如图 4, 无人机系统通过搭载的轻质、低成本、低功耗的传感器 (如相机、超声波等) 实现对环境状态的量测 y_k , 通过控制器设计, 实现由感知量测到控制输出 $u_{i,k}$ 的映射, 达到障碍规避的目的。该闭环结构中, 大大简化了无人机感知与规避的主要流程, 且感知信息高度耦合于控制器的设计当中, 因此保证其感知与规避功能的快速响应。

近年来, 随着小、微型无人机系统在军民领域, 如情报侦察^[72]、地理测绘^[3]、休闲娱乐^[73]等不断普及应用, 面向小、微型无人机系统的低成本感知与规避系统得到了广泛的研究。各种小体积、低重量、低成本的传感器, 如单目相机^[64, 74~76]、双目相机^[15, 77, 78]、深度相机^[79, 80]以及处理器, 如 Raspberry Pi^[81]、NVIDIA TX^[82]、Intel NUC^[83]系列等在小、微型无人机的感知与规避系统设计中得到了广泛的应用。单目相机体积小、低成本, 是小型无人机的主要信息感知来源。但单目系统自身很难获得目标和场景的深度信息, 需要进一步融合其他机载感知信息, 如自身运动等完成对目标深度的有效感知。Alvarez 等^[74]提出了一种基于单目视觉的四旋翼无人机感知与规避系统, 通过融合单目传感器感知信息和自身运动测量基于机载实时处理系统构建地图的方式, 实现在室内场景中反应式的碰撞规避, 类似的方法如文献^[64, 75]。Lyu 等^[76]设计了一种单目视觉感知与规避系统, 包括单目相机以及机载处理系统, 不依赖深度信息, 仅基于角度感知信息实现了小型无人机对空中目标的有效障碍规避。为了解决单目相机在深度估计方面的不足, 基于深度相机^[79, 80]、双目相机^[15, 77, 78]、激光雷达^[16, 84]等感知方法和系统得到了广泛的研究。通过实时生成环境三维点云和控制器设计, 实现无人机在稠密障碍物场景中的障碍规避。在复杂的飞行任务中, 基于单一传感器的感知与规避系统往往难以保障无人机的飞行安全, 搭载多种类型的传感器能够大大提高系统的任务能力和安全性^[85, 86]。其中 Gageik 等^[86]提出了一种低成本多传感器障碍规避系统, 通过搭载红外、视觉、激光等多种类型传感器和机载处理系统, 能够实现在复杂的火灾场景中的搜救任务并保证障碍规避。

5 展望

随着无人机系统在军事和民用领域的大量的技术研究和系统推广应用, 未来空域将呈现大范围无人机与有人机进行航路共享, 任务协同的局面。感知与规避功能是无人机未来应用的需要具备的核心

功能之一. 近年来, 各个国家、组织和研究机构围绕无人机的关键技术、系统研制和测试进行了大量的研究工作, 并推动了相关航空法规、政策的制定和实施. 但是当前无人机感知与规避相关的政策法规、技术与系统测试仍处于起步阶段, 真正实现无人机的可靠、高效任务执行仍存在诸多挑战.

- 国家、组织相对滞后的无人机政策法规和制造、测试标准已经成为制约无人机发展的重要因素. 未来无人机的广泛应用势必带来空中交通政策法规的变革以及空中交通技术体系的革新. 尽快制定和完善无人机相关的航空法规和相关政策, 为 SAA 技术的研究提供导向性参考, 能够促进无人机应用和相关产业的健康发展.

- 现有的无人机感知与规避的技术研究难以保证无人机在复杂场景下应用的安全保障. 在无人机的应用场景中, 无人机将面临静/动态, 合作/非合作等多种碰撞威胁, 以及单机/多机/混合等多种任务模式, 现有的感知、规划和控制方法往往针对某一具体应用场景中的碰撞规避实现, 实现可靠稳定的复杂场景下的感知与规避功能仍需要大量的基础技术研究, 如基于多源感知信息下的稳定、精确的环境感知技术, 复杂航空规则和应用场景下的态势评估与路径规划以及高可靠、优化机动控制技术等.

- 仍处于初始阶段的感知与规避系统测试与功能验证难以保证无人机感知与规避功能的可靠运行. 尽管基于多种感知与规避系统研制与测试见诸报道, 但仅仅局限于单一场景、局部区域或部分功能的系统设计 with 功能测试. 无人机感知与规避系统设计与测试将经历由地基为主到地/空结合, 由局部空域特定类型无人机到全空域全类型无人机规避标准化设计的发展过程. 最终实现无人机自主化、智能化的任务执行与空域飞行安全.

参考文献

- 1 Hu Z P, Tian B C. Battlefield application and development trend of drones under informatization conditions. *Aerod Missile J*, 2011, 10: 63–65 [胡正平, 田弼臣. 信息化条件下无人机的战场应用及发展趋势. *飞航导弹*, 2011, 10: 63–65]
- 2 Li D R, Li M. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system. *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2014, 39: 505–513 [李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2014, 39: 505–513]
- 3 Guo S Y. Research on earth observation coverage for multiple unmanned rotorcraft. Dissertation for Master Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 [郭首宇. 多旋翼无人机对地观测覆盖研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2014]
- 4 Gao J S, Zou Q Y, Chen S D. Research on anti-terrorism of foreign UAV system. In: *Proceedings of 2006 China UAV Congress*, 2006 [高劲松, 邹庆元, 陈峭东. 国外无人机系统反恐研究. 见: 2006 中国无人机大会, 2006]
- 5 Chen T. Design and research on visual positioning and tracking system for the small unmanned helicopter. Dissertation for Master Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 [湛婷. 小型无人直升机跟踪地面移动目标控制策略研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2013]
- 6 Huerta M. Integration of civil unmanned aircraft systems (UAS) in the national airspace system (NAS) roadmap. Federal Aviation Administration, 2013. <https://www.faa.gov/uas/resources/policy library/media/Second Edition Integration of Civil UAS NAS Roadmap July%202018.pdf>
- 7 Li Y J, Pan Q, Yang F, et al. Multi-source information fusion for sense and avoidance of UAV. In: *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, 2010 [李耀军, 潘泉, 杨峰, 等. 基于多源信息融合的无人机感知与规避研究. 见: 中国控制会议, 北京, 2010]
- 8 FAAF PART. 91 — General operating and flight rules. Federal Aviation Administration. 1991. <https://www.faa.gov/regulations policies/faa regulations/>
- 9 Weatherington D, Deputy U. Unmanned aircraft systems roadmap, 2005–2030. Deputy, UAV Planning Task Force, OUSD (AT&L), 2005. <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA445081>
- 10 Verstraeten J, Stuip M, van Birgelen T. Assessment of detect and avoid solutions for use of unmanned aircraft systems in nonsegregated airspace. In: *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Berlin: Springer, 2015. 1955–1979
- 11 Angelov P. Sense and Avoid in UAS: Research and Applications. Hoboken: Wiley, 2012

- 12 Billingsley T B. Safety Analysis of TCAS on Global Hawk Using Airspace Encounter Models. Massachusetts Institute of Technology Technical Report, 2006
- 13 Sahawneh L R, Duffield M O, Beard R W, et al. Detect and avoid for small unmanned aircraft systems using ADS-B. *Air Traffic Control Quart*, 2015, 23: 203–240
- 14 Fasano G, Accardo D, Moccia A, et al. Multi-sensor-based fully autonomous non-cooperative collision avoidance system for unmanned air vehicles. *J Aerosp Comput Inf Commun*, 2008, 5: 338–360
- 15 Lyu Y, Pan Q, Zhao C H, et al. Autonomous stereo vision based collision avoid system for small UAV. In: *Proceedings of AIAA Information Systems*, 2017
- 16 Özaslan T, Loianno G, Keller J, et al. Autonomous navigation and mapping for inspection of penstocks and tunnels with MAVs. *IEEE Robot Autom Lett*, 2017, 2: 1740–1747
- 17 Lester T, Cook S, Noth K. USAF Airborne Sense and Avoid (ABSAA) Airworthiness and Operational Approval Approach. 2014. <http://www.mitre.org/sites/default/files/publications/usaf-airborne-sense-avoid-13-3116.pdf>
- 18 Dalamagkidis K, Valavanis K P, Piegł L A. Current status and future perspectives for unmanned aircraft system operations in the US. *J Intell Robot Syst*, 2008, 52: 313–329
- 19 Zeitlin A, Lacher A, Kuchar J, et al. Collision avoidance for unmanned aircraft: proving the safety case. *JAIDS J Acq Immun Def Synd*, 2006, 21: 49–57
- 20 Accardo D, Fasano G, Forlenza L, et al. Flight test of a radar-based tracking system for UAS sense and avoid. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2013, 49: 1139–1160
- 21 Owen M P, Duffy S M, Edwards M W. Unmanned aircraft sense and avoid radar: surrogate flight testing performance evaluation. In: *Proceedings of IEEE Radar Conference*, 2014
- 22 Newmeyer L, Wilde D, Nelson B, et al. Efficient processing of phased array radar in sense and avoid application using heterogeneous computing. In: *Proceedings of the 26th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL)*, 2016
- 23 Yu H B. Research on the key technology of MMW radar for power line detection. Dissertation for Master Degree. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015 [喻江波. 毫米波雷达对电力线检测的关键技术研究. 硕士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2015]
- 24 Geyer C M, Dey D, Singh S. Prototype Sense-and-Avoid System for UAVs. Technical Report CMU-RI-TR-09-09. 2009
- 25 Li J P, Liu K, Li J M, et al. The invention relates to a multi-rotor uav ultrasonic anti-collision system. CN205353698U, 2016-06-29 [李家坡, 刘凯, 黎嘉明, 等. 一种多旋翼无人机超声波防撞系统. CN205353698U, 2016-06-29]
- 26 Dey D, Geyer C, Singh S, et al. Passive, long-range detection of aircraft: towards a field deployable sense and avoid system. In: *Field and Service Robotics*. Berlin: Springer, 2010. 113–123
- 27 Lai J, Mejias L, Ford J J. Airborne vision-based collision-detection system. *J Field Robot*, 2011, 28: 137–157
- 28 Song K T, Huang J H. Fast optical flow estimation and its application to real-time obstacle avoidance. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2001. 2891–2896
- 29 Mori T, Scherer S. First results in detecting and avoiding frontal obstacles from a monocular camera for micro unmanned aerial vehicles. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013. 1750–1757
- 30 Fu C, Olivares-Mendez M A, Suarez-Fernandez R, et al. Monocular visual-inertial SLAM-based collision avoidance strategy for fail-safe UAV using fuzzy logic controllers. *J Intell Robot Syst*, 2014, 73: 513–533
- 31 Heng L, Meier L, Tanskanen P, et al. Autonomous obstacle avoidance and maneuvering on a vision-guided MAV using on-board processing. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011. 2472–2477
- 32 Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Trans Syst Sci Cybern*, 1968, 4: 100–107
- 33 Li J, Sun X X. A route planning's method for unmanned aerial vehicles based on improved A-Star algorithm. *Acta Armament Aarii*, 2008, 29: 788–792 [李季, 孙秀霞. 基于改进 A-Star 算法的无人机航迹规划算法研究. 兵工学报, 2008, 29: 788–792]
- 34 Van T J. Development of an autonomous avoidance algorithm for UAVs in general airspace. In: *Proceedings of the 1st CEAS European Air and Space Conference*, 2007
- 35 Wang X, Yadav V, Balakrishnan S N. Cooperative UAV formation flying with obstacle/collision avoidance. *IEEE*

- Trans Control Syst Technol, 2007, 15: 672–679
- 36 Saunders J B, Call B, Curtis A, et al. Static and dynamic obstacle avoidance in miniature air vehicles. In: Proceedings of AIAA Infotech, 2005
 - 37 Lin Y, Saripalli S. Sense and avoid for unmanned aerial vehicles using ADSB. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015. 6402–6407
 - 38 Tu J, Yang S X. Genetic algorithm based path planning for a mobile robot. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. 1221–1226
 - 39 Durand N, Alliot J M, Médioni F. Neural nets trained by genetic algorithms for collision avoidance. Appl Intell, 2000, 13: 205–213
 - 40 Ma Y H, Zhou D Y. A chaotic genetic algorithm (CGA) for path planning of UAVs. J Northwestern Polytechnical Univ, 2006, 24: 468–471 [马云红, 周德云. 一种无人机路径规划的混沌遗传算法. 西北工业大学学报, 2006, 24: 468–471]
 - 41 Duan H B, Zhang X Y, Wu J, et al. Max-min adaptive ant colony optimization approach to multi-UAVs coordinated trajectory replanning in dynamic and uncertain environments. J Bionic Eng, 2009, 6: 161–173
 - 42 Liu S R, Mao L B, Yu J S. Path planning based on ant colony algorithm and distributed local navigation for multi-robot systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2006. 1733–1738
 - 43 Lu L, Gong D W. Robot path planning in unknown environments using particle swarm optimization. In: Proceedings of the 4th International Conference on Natural Computation, 2008. 422–426
 - 44 Richards A, How J P. Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming. In: Proceedings of American Control Conference, 2002. 1936–1941
 - 45 Wang Y, Zhu X P, Zhou Z, et al. UAV path following in 3-D dynamic environment. Robot, 2014, 36: 83–91 [王怿, 祝小平, 周洲, 等. 3 维动态环境下的无人机路径跟踪算法. 机器人, 2014, 36: 83–91]
 - 46 Neunert M, de Crousaz C, Furrer F, et al. Fast nonlinear model predictive control for unified trajectory optimization and tracking. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016. 1398–1404
 - 47 Zhu Y, Zhang T, Song J Y. Path planning for nonholonomic mobile robots using artificial potential field method. Control Theory Appl, 2010, 27: 152–158 [朱毅, 张涛, 宋靖雁. 非完整移动机器人的人工势场法路径规划. 控制理论与应用, 2010, 27: 152–158]
 - 48 Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. In: Autonomous Robot Vehicles. Berlin: Springer, 1986. 396–404
 - 49 Dong Z N, Chen Z L, Zhou R, et al. A hybrid approach of virtual force and A* search algorithm for UAV path replanning. In: Proceedings of the 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011. 1140–1145
 - 50 Li W. Behavior based control of a mobile robot in unknown environments using fuzzy logic. Control Theory Appl, 1996, 2: 153–162 [李伟. 在未知环境中基于模糊逻辑的移动机器人行为控制. 控制理论与应用, 1996, 2: 153–162]
 - 51 Han S C, Bang H, Yoo C S. Proportional navigation-based collision avoidance for UAVs. Int J Control Autom Syst, 2009, 7: 553–565
 - 52 Mujumdar A, Padhi R. Nonlinear geometric guidance and differential geometric guidance of UAVs for reactive collision avoidance. In: Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010
 - 53 Chakravarthy A, Ghose D. Obstacle avoidance in a dynamic environment: a collision cone approach. IEEE Trans Syst Man Cybern A, 1998, 28: 562–574
 - 54 Carbone C, Ciniglio U, Corrado F, et al. A novel 3D geometric algorithm for aircraft autonomous collision avoidance. In: Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 2006. 1580–1585
 - 55 Shanmugavel M, Tsourdos A, White B, et al. Co-operative path planning of multiple UAVs using Dubins paths with clothoid arcs. Control Eng Pract, 2010, 18: 1084–1092
 - 56 Sutton R S, Barto A G. Reinforcement Learning: An Introduction. Cambridge: MIT Press, 1998
 - 57 La H M, Lim R, Sheng W. Multirobot cooperative learning for predator avoidance. IEEE Trans Control Syst Technol, 2015, 23: 52–63
 - 58 Hung S M, Givigi S N. A Q-learning approach to flocking with UAVs in a stochastic environment. IEEE Trans Cybern, 2017, 47: 186–197
 - 59 Long P X, Liu W X, Pan J. Deep-learned collision avoidance policy for distributed multiagent navigation. IEEE Robot

- Autom Lett, 2017, 2: 656–663
- 60 van den Berg J, Lin M, Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multiagent navigation. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. 1928–1935
- 61 Chen Y F, Liu M, Everett M, et al. Decentralized non-communicating multiagent collision avoidance with deep reinforcement learning. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017. 285–292
- 62 Lyu Y, Pan Q, Hu J W, et al. Multi-vehicle flocking control with deep deterministic policy gradient method. 2018. ArXiv:1806.00196
- 63 Liang B, Hong B R, Shu G. Research on vision-action model of autonomous robot and obstacle avoiding. Acta Electron Sin, 2003, 31: 2197–2200 [梁冰, 洪炳镭, 曙光. 自主机器人视觉与行为模型及避障研究. 电子学报, 2003, 31: 2197–2200]
- 64 Aguilar W G, Casaliglla V P, Pólit J L, et al. Obstacle avoidance for flight safety on unmanned aerial vehicles. In: Proceedings of International Work-Conference on Artificial Neural Networks, 2017. 575–584
- 65 Wilson M. Ground-based sense and avoid support for unmanned aircraft systems. In: Proceedings of Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), 2012
- 66 Chamberlain L J, Scherer S, Singh S. Self-Aware Helicopters: Full-Scale Automated Landing and Obstacle Avoidance in Unmapped Environments. In: Proceedings of AHS Forum, 2011
- 67 Utt J, McCalmont J, Deschenes M. Development of a sense and avoid system. In: Proceedings of AIAA, 2005
- 68 Zarandy A, Nagy Z, Vanek B, et al. A five-camera vision system for UAV visual attitude calculation and collision warning. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision Systems, 2013. 11–20
- 69 Miller P C. General atomics successfully tests UAS sense-and-avoid system. Unmanned Aircraft System Magazine, 2014. <https://www.questia.com/read/1G1-402476896/general-atomics-tests-sense-and-avoid-system>
- 70 Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control. IEEE Robot Autom Mag, 2006, 13: 82–90
- 71 Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning. Nature, 2015, 518: 529–533
- 72 Tian J, Shen L C. Research on multi-base multi-UAV cooperative reconnaissance problem. Acta Aeronaut Et Astron Autica Sin, 2007, 28: 913–921 [田菁, 沈林成. 多基地多无人机协同侦察问题研究. 航空学报, 2007, 28: 913–921]
- 73 Ye X F. A HRI method based on stereo vision and deep learning for UAV. Dissertation for Master Degree. Tianjin: Tianjin University, 2017 [叶秀峰. 基于双目视觉和深度学习的无人机人机交互系统. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2017]
- 74 Alvarez H, Paz L M, Sturm J, et al. Collision avoidance for quadrotors with a monocular camera. In: Experimental Robotics. Berlin: Springer, 2016. 195–209
- 75 Dey D, Shankar K S, Zeng S, et al. Vision and learning for deliberative monocular cluttered flight. In: Field and Service Robotics. Berlin: Springer, 2016. 391–409
- 76 Lyu Y, Pan Q, Zhao C H, et al. Vision-based UAV collision avoidance with 2D dynamic safety envelope. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 2016, 31: 16–26
- 77 Oleynikova H, Honegger D, Pollefeys M. Reactive avoidance using embedded stereo vision for MAV flight. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015. 50–56
- 78 McGuire K, de Croon G, de Wagter C, et al. Efficient optical flow and stereo vision for velocity estimation and obstacle avoidance on an autonomous pocket drone. IEEE Robot Autom Lett, 2017, 2: 1070–1076
- 79 Iacono M, Sgorbissa A. Path following and obstacle avoidance for an autonomous UAV using a depth camera. Robot Auton Syst, 2018, 106: 38–46
- 80 Hu J, Niu Y F, Wang Z C. Obstacle avoidance methods for rotor UAVs using RealSense camera. In: Proceedings of Chinese Automation Congress (CAC), 2017. 7151–7155
- 81 Upton E, Halfacree G. Raspberry Pi User Guide. Hoboken: John Wiley and Sons, 2014
- 82 Weiss A, Rosenthal M, Mazlounian A. Realtime signal processing on NVIDIA TX2 using CUDA. In: Proceedings of Nvidia GPU Technology Conference (GTC), 2018
- 83 Rabl A, Salner P, Büchi L, et al. Implementation of a capacitive proximity sensor system for a fully maneuverable modular mobile robot to evade humans. In: Proceedings of Austrian Robotics Workshop, 2018
- 84 Grzonka S, Grisetti G, Burgard W. A fully autonomous indoor quadrotor. IEEE Trans Robot, 2012, 28: 90–100

- 85 Mohta K, Watterson M, Mulgaonkar Y, et al. Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *J Field Robot*, 2018, 35: 101–120
- 86 Gageik N, Benz P, Montenegro S. Obstacle detection and collision avoidance for a UAV with complementary low-cost sensors. *IEEE Access*, 2015, 3: 599–609

UAV sense and avoidance: concepts, technologies, and systems

Yang LYU, Tongna KANG, Quan PAN*, Chunhui ZHAO & Jinwen HU

School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

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

Abstract Unmanned aerial vehicle (UAV) sense and avoidance is one of the core technologies for integrating UAV into airspace, and it is a significant symbol of UAV autonomy and intelligence. Critical technologies and systems have been gradually developed over the past few years. We review studies related to the concept, techniques, and systems on UAV sense and avoidance, which is based on policies, regulations, and techniques. Moreover, we review the environment sensing technology related to collision avoidance path planning and maneuver control. We also propose two different systematic levels of sense-and-avoid (SAA) considering the differences in platform properties, application scenarios, and operational manners of the large/middle-sized and small/micro-sized UAVs. Furthermore, two different system paradigms, i.e., the hierarchical paradigm and reactive paradigm, are proposed to guide the system design of SAA. Finally, our study provides the prospect of sense and avoidance based on policies and regulations, technologies, and system design.

Keywords unmanned aerial vehicle, environment sensing, collision avoidance, path planning, maneuver control

Yang LYU received his B.S. degree in automation from Guizhou University. He is currently a Ph.D. student at School of Automation, Northwestern Polytechnical University. His current research interests include robotics navigation and control, estimation theory and application, and multi-agent system control.

Tongna KANG received the B.S. degree in automation from Northwestern Polytechnical University (NPU). She is currently a Master's student at the School of Automation, NPU. Her current research interests include target tracking, trajectory prediction, risk assessment, and robotics navigation and control.

Quan PAN received his B.E. degree from Huazhong Institute of Technology in 1991, and M.E. and Ph.D. degrees from Automation School at Northwestern Polytechnical University (NPU) in 1991 and 1997, respectively. He is currently a Professor of School of Automation, NPU. His research interests include information fusion, multi-scale estimation theory, target tracking, and image processing.

Chunhui ZHAO received his B.E. degree from School of Mechanics, Southwestern Jiaotong University in 1996, and his M.E. and Ph.D. degrees from the Automation School at Northwestern Polytechnical University (NPU) in 2003 and 2008, respectively. He is currently an Associate Professor of School of Automation, NPU. His research interests include vision-based navigation, image processing, and target tracking.