

国外无伞空投准备阶段技术研究进展

郭洁^{a*}, 郭彦鹏^{b*}, 张凤先^c, 马安鹏^a, 程新炎^a

(武警工程大学 a.装备管理与保障学院 b.研究生大队 c.基础部, 西安 710086)

摘要: **目的** 对国外无伞空投准备阶段关键技术的研究进展进行综述和分析, 旨在促进无伞空投技术体系化发展, 提高我国空投保障能力。 **方法** 通过对相关文献的梳理和分析, 详细论述了国外环境监测、精准投放和无人机自主规划技术的发展现状, 在此基础上预测无伞空投准备阶段技术发展趋势。 **结果** 国外无伞空投准备阶段技术研究是以投放的精准度为核心展开的, 包括环境影响对抗、空投点预测与识别、线路自主规划等相关的检测技术、监测技术、导引技术和算法模型。 **结论** 无伞空投准备阶段技术未来发展趋势为注重微型环境监测传感器技术, 智能化处理实时数据, 聚焦导航导引控制技术, 确保物资投送精准可控, 锚定智能飞行控制技术, 开发无人机群自主投送平台以及加快无人机精确投送平台的列装, 有助于推动我国无伞空投的发展。

关键词: 无伞空投; 准备阶段; 环境监测; 精准投放; 无人机自主规划

中图分类号: V249; TB485.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2025)03-0253-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.030

Overseas Research Progress on Preparatory Phase Technology of Airdrop Without Parachute

GUO Jie^{a*}, GUO Yanpeng^{b*}, ZHANG Fengxian^c, MA Anpeng^a, CHENG Xinyan^a

(a. College of Equipment Management and Security, b. Postgraduate Brigade, c. Foundation Department, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

ABSTRACT: The work aims to review and analyze the research progress of key technologies in the preparation phase of airdrop without parachute in foreign countries, so as to promote the systematic development of airdrop without parachute technology and improve China's airdrop guarantee capability. By combing and analyzing the relevant literature, the development status of foreign environmental monitoring, precision drop and UAV (unmanned aerial vehicles) autonomous planning technology was discussed in detail, and the development trend was predicted on this basis. The foreign technology in the preparation phase of airdrop without parachute was unfolded with the precision of placement as the core, including the detection technology, monitoring technology, guidance technology and algorithmic model related to the environmental impact confrontation, prediction and identification of the airdrop site, and autonomous planning of the route. The future development trend of airdrop without parachute preparation phase technology is to focus on micro-environmental monitoring and sensing technology, intelligent processing of real-time data, focusing on navigation and guidance control technology to ensure precise and controllable material delivery, anchoring intelligent flight control technology, developing autonomous delivery of UAV swarms as well as accelerating the launch of UAV precision delivery platforms, which will help to promote the development of airdrop without parachute in China.

KEY WORDS: airdrop without parachute; preparatory phase; environmental monitoring; precision delivery; UAV path planning

无伞空投是装备、物资不系降落伞的空投方式^[1]。随着新材料、新工艺和新技术的发展,无伞空投在高空^[2-3]、低空^[4-5]和超低空领域均可实现,其在各个空域的优势各不相同,实现难易程度也各不相同。目前,结合运输无人机的发展现状,利用无人机在低空和超低空领域进行无伞空投具有明显优势,其具有快速、灵活、精准、成本低、不受地形条件限制等特点^[6],适用于紧急情况下投送物资及装备器材,如食品、服装、药品^[7]、血液^[8]、油料^[9-10]、救援器材^[11-12]等,在应急救援任务中扮演着至关重要的角色。国外无伞空投技术相关研究起步较早,技术积累相对深厚,尤其是美国,已完成多类型无伞空投系统的研究。美国研发与部署多种无伞空投系统,实现运输机、运输直升机无伞空投,并在实践中持续更新迭代,形成了多种空投载荷规格以满足不同保障需求,目前主要运用的无伞空投系统有 Copter 盒子一次性空投系统、TRIAD 纸箱空投系统 (Tri-wall Aerial Delivery System)、RRDAS 快速拆装索具空投系统 (Rapid Rigging De-Rigging Airdrop System)。值得关注的是,美国正积极研制下一代无伞空投系统,将 JPADS 联合精确空投系统 (Joint Precision Air Delivery System) 的航程和效率与无人机的精确导航能力相结合^[13-15],开发出能自主完成任务的 ADDAS 无人机自主交付空投系统 (Automated Drone Delivery from Airdrop Systems) ^[16],这种系统具备将机载多旋翼无人机有效载荷精准投放到距离地面落点 5 m 以内的能力,为无人机精确空投技术的发展开辟了新的方向。目前,国内对无伞空投缓冲问题的研究主要聚焦于缓冲材料性能^[17-19]和缓冲包装设计^[4,20]方面;对无伞空投精确性问题的研究主要集中在运动轨迹研究、装置系统运用、构建仿真模型、影响因素分析和风场环境研究 5 个方面。无伞空投运动轨迹的研究主要借鉴空投导弹^[21-22]、鱼雷^[23-24]等物体的运动轨迹研究方法,集中研究了不同形状空投体、不同空投角度对运动轨迹的影响^[25-26];无伞空投平台仍以运输机和运输直升机为主,无人机无伞空投研究较少,未见以无人机为平台的相同或类似于美国 ADDAS 无人机自主交付空投系统的无伞空投系统。

为推动国内无伞空投技术体系化发展,形成有利于推广应用的技术层次和技术逻辑,笔者对当前国外现已实现的自由落体空投^[27]、滑翔翼无人机空投^[28]、低空吊装空投^[29]和可回收火箭空投^[30]等无伞空投模式进行分析,将无伞空投过程划分为空投准备、空中降落以及落地缓冲 3 个阶段,对每个阶段的关键技术和重要影响因素进行分析。空投准备阶段需根据目标区域的风向风速、气象条件、地形地貌等因素,预测计算选择最佳的空投时机和空投方式。空中降落阶段指空投物离开飞机后会进行自由落体运动,需通过一系列的设计和优化来降低其下降速度,减小冲击力,并确保在预定时间内准确降落到目标区域。落地缓冲

阶段指空投物接近地面时,需通过缓冲材料来减小冲击力,保护内部物品的完整性和安全性。笔者对无伞空投准备阶段技术进行了梳理和分类,同时对国外相关技术研究进展进行了深入分析,并探讨了无伞空投准备阶段技术的未来发展趋势。

1 无伞空投准备阶段技术分类

无伞空投准备阶段涉及多项技术,在高空和中空条件下,用于无伞空投的运输机和直升机平台需重点考虑风的影响。首先通过环境监测技术准确掌握空投区域的风速、风向等气象条件,然后输入风速、风向、目标距离、飞行速度和空投高度等监测数据,利用精准投放预测与计算技术确定释放点、落点位置和最佳释放时机,从而提高投放的准确度和效率。在低空条件下,作为物资无伞空投的无人机体受风的影响相对较小,通过自主规划技术智能避障,可确保无伞空投在复杂的环境条件下实现物资精准高效投放。无伞空投准备阶段技术主要分为环境监测技术、精准投放预测与计算技术、无人机自主规划技术。

1.1 环境监测技术

风速、风向、空投高度等环境条件直接影响着无伞空投的准确性、安全性和成功率。风的不确定性是导致空投系统着陆误差的主要因素之一。因此,实时获取风速、风向等气象环境数据对准确计算无伞空投的物资释放点至关重要。空投高度越高,物资在空中的下降时间越长,受到大气湍流和其他环境因素的影响就越大,易导致轨迹偏离预定路径。在无伞空投准备阶段,操作人员必须实时掌握投送区域的环境条件,并根据环境监测动态进行评估和决策。当前国外无伞空投准备阶段用于环境监测的设备主要包括 GPS 测量风速、风速传感器、高度计、风廓线雷达等,常用的几种环境监测设备的优缺点情况如表 1 所示。

1.2 精准投放预测和计算技术

无伞空投的精准投放包括释放点的计算、投送轨迹的规划算法、物资的姿态控制,这些因素与执行任务的空投平台类型以及空投物资的重量密切相关。在物资释放前,需考虑风速、风向、空投高度和飞行速度等因素对释放点计算的影响。根据目标点的距离、飞行速度和风速等数据,进行详细的预测和计算,以确定最佳的释放时机,从而提高投放的精确性。其次,精确投放还包括对落点位置的准确计算,空投物资释放后,主要受到重力、空气阻力和风力 3 种外力的共同作用,这些作用力决定了物资在空中的运动轨迹和最终落点。在规划物资空中运动轨迹时,必须充分考虑这些力的相互作用,以实现精准投放。特别是风力,它对空投物资的运动轨迹有着显著的影响。

表 1 环境监测设备对比
Tab.1 Comparison of environmental monitoring equipment

环境监测设备	测量原理	测量方法	优点	缺点	风向、高度测量
GPS 测量风速	卫星信号相位	通过接收器与卫星间距离变化确定速度和方向	全球覆盖, 实时性强, 误差小	精度受多路径效应影响, 高度和风速测量精度较差	可测量风向
热型风速传感器	热敏元件温度变化	测量风流带走热量导致的传感器温度变化	结构简单, 成本低廉	受环境温度影响较大, 测量精度有限	不可测量风向
旋转型风速传感器	旋翼旋转速度	旋翼旋转速度与风速成正比	直观, 易于理解	受旋翼磨损影响, 维护成本	可测量风向
超声波型风速传感器	超声波脉冲传播时间	测量超声波脉冲往返时间变化	无机械部件, 稳定性好、可靠性高	受声波传播环境影响、成本高	可测量风向
风廓线雷达	多普勒频移	测得雷达径向速度, 多射向速度测量在假定条件下估测风向、风速和垂直运动	垂直方向风场测量, 覆盖范围广, 实时提供风向、风速数据	设备复杂, 成本高	可测量三维风场信息
雷达高度计	雷达波反射时间	测量雷达波往返时间确定距离	精度高, 适用于动态测量	成本较高, 设备复杂	高精度测量
气压高度计	大气压力变化	测量大气压力计算高度	成本低, 操作简单	精度受气压变化影响	一般高度测量

导航导引控制技术的运用可确保物资在释放后能按照预定轨迹飞行。导航系统通过卫星定位和地面雷达等手段, 提供关键的飞行数据和目标位置信息, 指导无伞空投平台准确到达目标区域。导引技术则利用激光、红外线和雷达等传感器, 实现无伞空投平台与目标区域的精确匹配, 确保物资投放的精准性。通过模拟仿真预测和计算, 导航导引控制技术能动态调整无伞空投平台的飞行路径和投放时机, 评估风因素对空投落点的影响, 进一步优化释放点位置。

1.3 基于无人机空投的自主规划技术

无人机凭借其高效便捷、成本低、精确性高的特点, 已成为应急救援中不可或缺的物资运输投送平台。无人机可在低空悬停时释放物资使其自由落体, 也可将物资吊运至地面。无论采用何种无伞空投模式, 本质都是通过无人机自主飞行路径规划、自动视觉识别、智能释放点计算等方面的能力, 替代有人直升机、运输机完成小件和中件物资的自动化投送。无人机自主飞行路径规划技术需进行软件编程, 以子系统的形式集成到无人机上, 通过机载计算机进行统一调度与执行, 实现了物资投送的无人化智能化。如图 1 所示, 无人机闭环自主无伞空投系统可细分为 3 大关键技术: 机载目标识别与位置预估、空投计划以及导引控制技术。这些技术不仅确保了目标识别的精确性和位置预估的准确性, 而且通过优化物资投送算法, 提升了物资无伞空投的效率和准确性。

1.3.1 机载目标识别与位置预估技术

机载目标识别与位置预估技术在无人机无伞空投任务中扮演着至关重要的角色。该技术通过集成视觉光谱图像分析与先进的目标识别算法, 实现了对地面目标的自动搜索与识别。输入的视觉数据经过系统处理, 能迅速识别并锁定图像中的目标特征。当目标

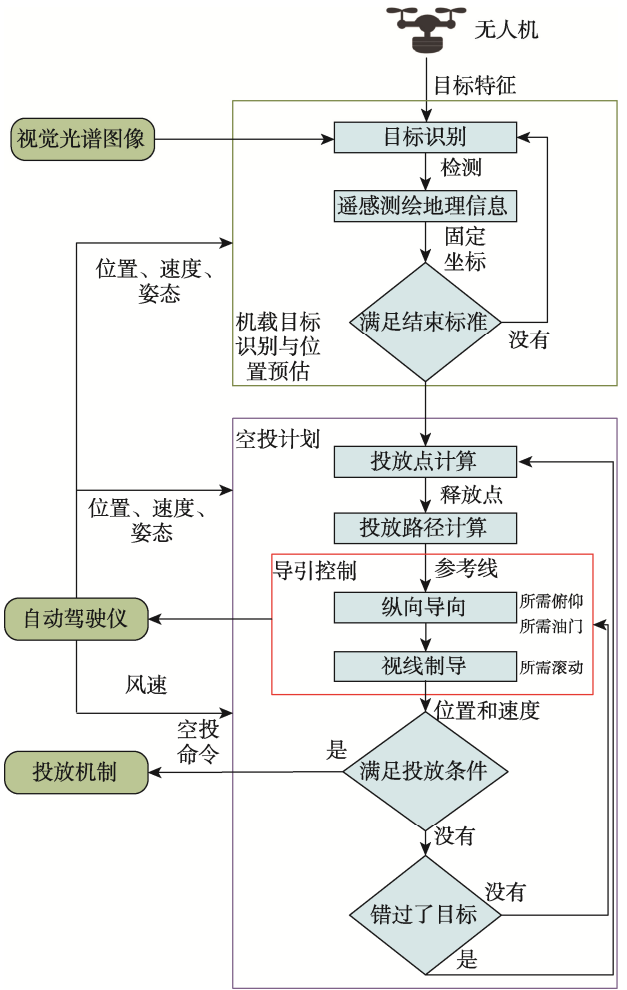


图 1 无人机自主规划空投系统运行机制
Fig.1 Mechanisms for autonomous planning of airdrop system operations by UAV

被成功检测到后, 系统进一步应用无人机遥感测绘地理信息系统技术 (Geographic Information System,

GIS)^[31], 不仅能提高地理信息的采集效率和处理精度, 准确计算出目标的固定坐标, 还能为后续的空投计划提供数据支撑。

1.3.2 空投计划技术

空投计划技术是无伞空投任务中的关键组成部分, 负责接收并处理来自目标识别与位置预估子系统的的目标位置估计数据。该系统采用先进的路径规划算法, 通过 Dubins 曲线以局部最优逼近全局最优的航迹优化方法^[32], 计算无人机从当前位置出发到达理想释放点的最优飞行路径。Dubins 曲线航迹优化算法以其在路径优化中的高效性而著称, 能为无人机生成一条既安全又经济的飞行轨迹。算法的输出是一系列有序的参考点, 这些参考点定义了无人机的导航路径, 为无人机提供了精确的导航参考线。这些导航参考线随后被传输至导引控制子系统, 该子系统负责根据参考线实时调整无人机的飞行姿态和轨迹, 确保无人机能沿预定路径稳定飞行, 并在计划的位置准确释放物资。空投计划技术不仅提高了空投的精确度, 还增强了无人机在执行复杂任务时的自主性和环境适应性。

1.3.3 导引控制技术

导引控制技术利用视线导引算法, 精确计算无人机的运动路径。在纵向平面上, 导引控制器负责维持无人机的稳定飞行高度。导航系统由自动驾驶仪执行, 它接收导引控制子系统的设定, 并实施对无人机的低级控制。自动驾驶仪还负责向空投计划子系统和导引控制子系统提供风力估算数据。若无人机未能接近至释放点, 将导致目标未命中, 此时需重新计算并调整释放点。目标坐标由目标识别与位置预估子系统提供, 而空投计划系统将这些坐标作为其路径规划算法的输入数据。此外, 空投计划系统还接收来自导引控制子系统的位置和速度估算数据作为反馈信息。

2 国外无伞空投准备阶段技术研究进展

2.1 环境监测技术研究进展

美国陆军开发了一种精确的高度-移动-声波传感器, 以消除 GPS 高度偏差问题^[33]。以往高度测量多用气压、雷达、激光和微波技术, 但各有局限。气压测量需已知地面压力, 雷达和激光无法穿透树叶, 微波需大型昂贵设施, 不适用于小型偏远地区。美国陆军选择声音检测和测距技术 SODAR (Sound Detection and Ranging) 作为空投终端区域精确高度测量方式, 声波能穿透树叶并提供良好地面回波。如图 2 所示, SODAR 传感器直径为 1.7 cm, 高为 25.4 cm, 质量为 1.6 kg。传感器垂直安装, 扬声器向下, 便于观察地面; 安装方式灵活, 适用于不同物资空投。传感器工作时发射 3~3.5 kHz 的线性声音脉冲, 通过检

测反射脉冲确定离地高度, 且该频率不受云、雾、灰尘等影响, 结合其他传感器可精准确定下降高度和速度; 最大工作范围为 60.96~304.8 m, 取决于空投环境, 测量精度<0.6 m, 比 GPS 精度高。后续该传感器在美国陆军尤马试验场进行了多次空投演示, 证实该传感器可大幅提高空投物资高度精度。



图 2 SODAR 高度传感器^[33]
Fig.2 SODAR height sensor^[33]

除 SODAR 高度传感器外, 美国陆军还研发了其他物资空投传感器。2020 年, 其与 STARA 技术公司合作开发超宽带雷达高度传感器 (图 3)。新雷达系统坚固且成本低, 可感知软硬表面, 绘制地面坡度和物体。如图 3 所示, 该雷达高度传感器的预期优势是: 脉冲系统拦截概率低、可跟踪多个目标、静音操作、可忽略灰尘和其他空气中的颗粒物、可探测到树木和地面、视角宽、体积和重量小、成本低。目前该雷达传感器仍在测试中, 但已展现出了较为广泛的应用前景。此外, 风速实时测量也是国外近年来的研究重点。Yakimenko 等^[34]研究表明, 风是影响物资空投精度的关键因素, 通过改进对风的各项指标的估算和适应风的变化, 可显著提高空投物资的着陆精度。为确保空投安全精准, 必须实时更新风速风向数据。美国陆军设计了一款全新的风速传感器 (图 4), 专门针对空投系统飞行的终端导引阶段。它通过在导引装置上安装超声波风速计, 测量风对声脉冲传输时间的影响来确定风矢量的线性分量, 其技术原理为声波在移动介质中的传播速度与介质的移动速度和方向以及声波本身的传播方向有关。超声波风速计具有时间常数短且无移动机械部件的优点, 该风速传感器与自适应无线网络结合, 使多个空投系统都能接收实时风信息。

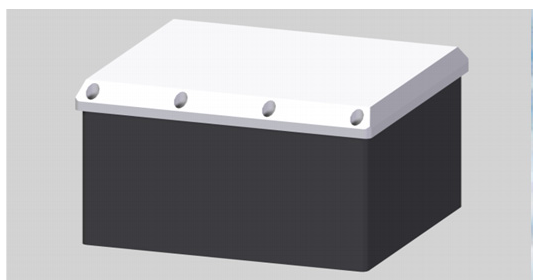


图 3 超宽带雷达高度传感器^[33]
Fig.3 Ultra-wideband radar altitude sensor^[33]



图 4 风速传感器^[33]
Fig.4 Wind speed sensor^[33]

目前, 风数据由空投前不久在落区附近发布的 GPS 测风仪提供。Meier 等^[35]研究风廓线算法, 所需的风数据来自被动红外和微波卫星探测。大气红外探测器 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 提供了一个三维温度场, 并确定了 100 个标准高度。在这些数据中, 等压面的斜率和温度梯度被用来利用热成风关系计算风速和风向。通过与 AIRS 探空坐标和时间附近的 GPS 测风仪测量值进行比较, 利用风廓线雷达测量风速并分析了目标坐标附近风量的影响。Herrmann 等^[36]提出用地面激光雷达获取着陆目标附近的实时风廓线, 辅助空投系统规划轨迹, 如图 5 所示。激光雷达能实时估算目标周围风场, 并将数据传输至空投系统, 这些数据与机载风估算值结合, 用于规划飞机空投轨迹。通过蒙特卡罗模拟用于生成着陆精度统计数据, 以评估当来自激光雷达单元的信息被纳入典型的导引空投系统时着陆精度的改进。仿真结

果显示, 结合激光雷达的风信息, 空投系统着陆精度提高了 3 倍。结果表明, 覆盖飞行最后进近阶段的风测量是最关键的, 即使对地面附近的风廓线进行少量离散测量, 也有可能大大提高着陆精度。

以上大部分环境监测技术基于有伞空投, 有伞空投对环境监测精度要求较高, 依赖于先进的环境监测传感器技术和实时数据分析, 而无伞空投对环境监测技术精度要求稍低, 因此有伞空投环境监测传感器技术的研究方法和理论同样适用于无伞空投, 且可预见的是, 更加小型化、集成化、智能化的高精度环境监测传感器将被广泛应用于无伞空投系统中。此外, 通过结合卫星遥感、地面雷达和机载传感器的数据, 无伞空投系统将实现复杂环境数据的实时感知, 并具备自主决策能力, 从而在各种复杂环境条件下保证物资的精确投放。

2.2 精准投放预测和计算技术研究进展

无伞空投大多数为无动力的自由落体运动, 其投放的精准度取决于释放点计算和风等环境因素的影响。马萨诸塞州汉斯科姆空军基地空投团队通过任务规划工具提高了空投的准确性。他们设计了一款接收天气信息并计算飞机释放点的软件, 为飞机提供准确的空投区域信息。之前美国空军需 2 次飞行以空投物资, 即先获取天气数据再投送。该团队的研究简化了空投流程, 只需 1 次飞行即可精准计算释放点。Pramod 等^[37]开发了一种自动导引装置, 利用 GPS 导引系统将飞机空投货物运至预定区域, 该系统支持在多个地点进行空投作业, 即使在恶劣天气或受限环境中也能提供所需空投物资。Arangala 等^[38]在此基础上开发了一种数学模型来计算有效载荷的释放坐标, 如图 6 所示, 该团队提出的飞机物资空投流程包括记录传感器参数, 如飞机高度、速度、风速和风向。物资质量、表面积、目标位置、阻力和空气密度等恒定参数需在无人机起飞前确认, 风力和高度通过传感器计算得出。当算法找到释放点时, 算法将发出释放物资的指令, 树莓派 (Raspberry Pi) 向伺服电机发出信号以释放物资 (图 7)。

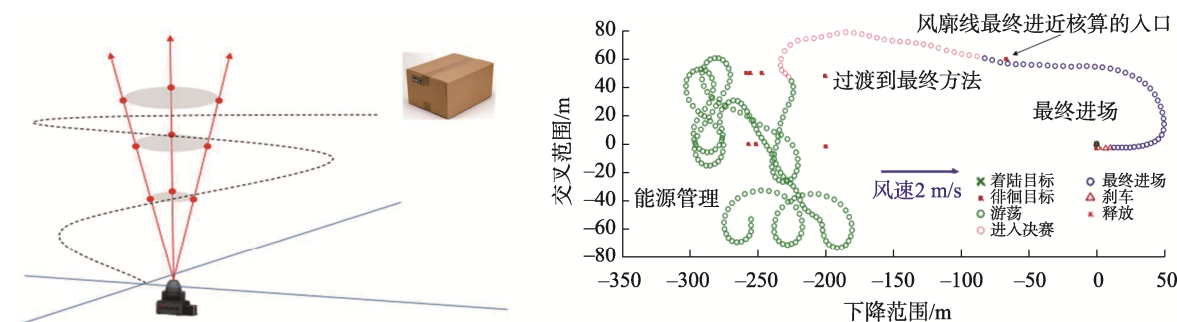


图 5 地面激光雷达系统辅助空投系统规划轨迹^[36]
Fig.5 Ground LIDAR system-assisted airdrop system planning trajectory^[36]

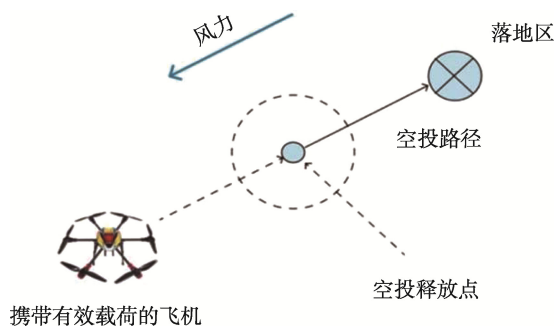


图6 飞机物资空投释放路径^[38]
Fig.6 Aircraft material airdrop release path^[38]

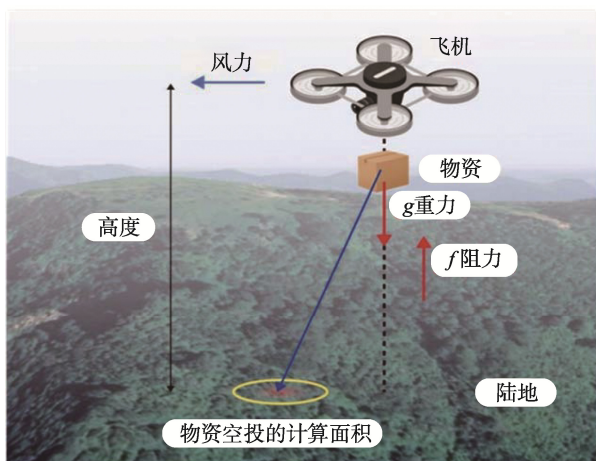


图7 模拟物资空投过程^[38]
Fig.7 Simulated material airdrop process^[38]

无伞空投系统投放的精准度是衡量空投实用性能最关键的指标,国外非常重视无伞空投精准投放相关技术的发展,旨在提高物资的投放精度,扩展无伞空投的任务空间和领域。国外研究表明,无伞空投精准投放的研究主要集中在2个方面:一是改进空投工具和流程,二是开发新的算法和自动导引装置。无伞空投精准投放技术趋向于进一步整合实时环境监测、先进的导引算法和自动化控制系统,以提高投放的精度和可靠性。

2.3 基于无人机空投的自主规划技术研究进展

当前,无人机已广泛应用于应急救援保障领域,专为救援物资运输设计的无人机可以精准、智能的方式提供大量货物,成为国外研发重点。伦敦国王学院药学研究所 Hii 等^[39]测试了无人机运输对药品质量的影响,证明无人机运输胰岛素药品是可行的。Mathisen 等^[40]开发了无人机自主空投系统,无人机通过视觉光谱分析和实时数据处理识别目标,自主规划飞行轨迹确定最优路径,计算释放点。德国航空航天中心启动 ALAADY 自动低空投送(Automated Low Altitude Delivery)项目^[41],开发可运输 1 t 载荷的速度为 100 km/h、续航为 500 km 的全自动货运无人机。目前国外研究聚焦于无人机空投的飞行轨迹优化与

落点精确控制。

Schopferer 等^[42]研究无人机自主规划飞行轨迹,提出了基于地理空间数据集和飞机动态模型的风险建模和评估的概念和方法,介绍了机载和在线轨迹规划软件框架的设计及实验结果。研究表明,基于风险的无人驾驶飞机运动规划可使无人机在机载计算资源有限的情况下实现安全自主飞行。Ivanovic 等^[43]研究了多旋翼无人机的抛物线空投轨迹规划,开发了轨迹规划器和算法,如图8所示,无人机可穿过复杂城市环境到达空投发射点并精准空投物资,确保了未来通过无人机大规模进行物资投送的可行性和潜力。

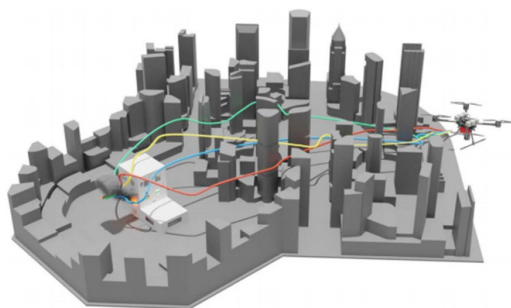


图8 无人机穿过复杂城市环境到达空投点^[43]
Fig.8 Drone travelling through a complex urban environment to reach an airdrop launch site^[43]

然而,实际应用中可能会遇到干扰,如电子干扰或烟雾导致的定位不准确,这可能影响空投精度。为提高空投精度,解决无人机的路径规划问题,Jana 等^[44]提出将整个地形转化为网格单元图,在其中标记出障碍物和自由路径。该法可在 GPS 引导的坐标系中找出最短无障碍路径和适宜的飞行角度,对救援行动和高效运输具有适用性。日本千葉大学片岡等^[45]提出了一种无人机路径规划方法,可避开对无人机影响较大的风区,在这项研究中,假设无人机可测量当前位置以及该点的风向和风速;模型预测控制执行路径规划,预测无人机周围的风力状况,避开多风区域。Skye 等^[46]设计了一种可视化飞行轨迹建模系统(图9),该系统提供了一个直观的图形用户界面,用户可在界面上指定轨迹目标、添加和删除运动约束,并实时更新约束参数。系统使用界面算法将图形化的约束条件转换为底层最优控制问题的标准形式,并通过生成一系列的凸优化问题来逼近轨迹规划问题的解。

Gopi 等^[47]提出了未来研究的方向,开发能动态响应环境变化的 3D 路径规划器以抵抗外部干扰,如风、天气变化和其他意外情况的路径规划算法,优化多无人机的路径规划,以覆盖更大的区域,适用于物资投送和搜索救援等方面。针对多无人机系统的路径规划问题,Volkman 等^[48]提出了一种基于改进粒子群优化算法的高效路径规划方法,在初始种群生成和预测策略上进行了优化,能高效地识别近似最优路径,该算法在多无人机系统的自主路径规划中具有实际应用价值。

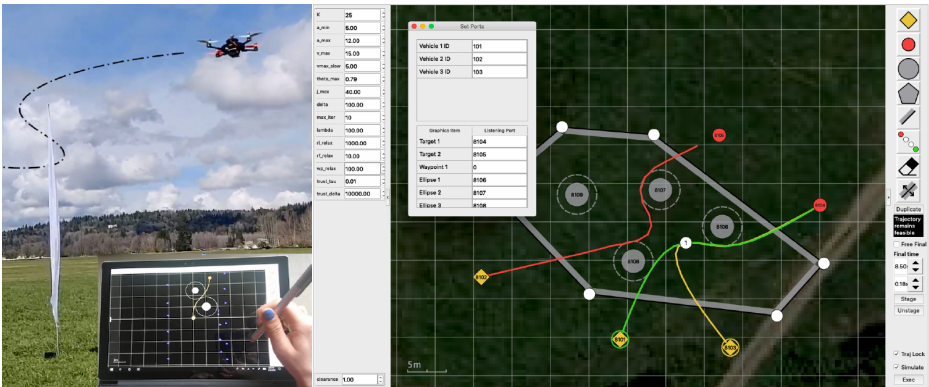


图 9 飞行轨迹规划实时视觉建模系统^[46]
Fig.9 Real-time visual modeling system for flight trajectory planning^[46]

国外研究表明,无人机的发展为物资投送提供了新的解决方案,可在应急救援任务中实现通信、医疗物资的快速投送。当前研究重点为无人机空投的抛物线规划和落点精准控制,尽管其仍面临着精准度、复杂环境和无人机集群等方面的挑战,但随着研究的深入和技术的发展,这些问题有望得到解决,未来的无人机自主路径规划将更加注重复杂环境的安全性和鲁棒性。

3 无伞空投准备阶段技术发展趋势

无伞空投作为一个被全新赋能的领域,在无伞空投准备阶段融合人工智能、传感器、物联网、飞行控制、无人机、机器学习等多项高新技术,可实现更精准、更可靠、更安全、更经济的物资投送。通过对国外无伞空投准备阶段相关技术研究进展的分析,可以看出无伞空投准备阶段的技术研究是以投放的精准度为核心展开的,包括环境影响对抗、空投点预测与识别、线路自主规划等相关的检测技术、监测技术、导引技术和算法模型。基于此,本文对无伞空投准备阶段落点精准控制技术的发展趋势有以下 3 点展望。

3.1 注重微型环境监测传感器技术,智能化处理实时数据

通过集成微型化环境监测传感器,为无伞空投准备阶段提供了全面的监测信息,智能化传感器的实时数据处理与分析能力显著增强,使无伞空投系统能实时处理大量环境监测数据,为决策提供了可靠的数据支持。一是实现传感器的微型化与集成化升级。传感器正逐步向微型化和更高的集成度转型升级,能轻松安装在无人机平台上。这些微型传感器不仅集成了高度计、风速计等核心设备,还囊括了其他环境监测设备,极大地提升了系统的集约性和效率。二是进行多传感器数据融合技术的优化。通过深度整合来自 GPS、风廓线雷达、红外和超声波雷达等多种传感器的数据,无伞空投系统得以提供更为全面且精准的环

境监测信息,而且成本更低。三是提升实时数据处理与分析能力。随着云计算技术的飞速发展,无伞空投系统已具备了实时处理和分析大量环境监测数据的能力,不仅能提供即时的反馈,还能为决策者做出更为精准和及时的决策提供支持。

3.2 聚焦导航导引控制技术,确保物资投送精准可控

未来的无伞空投系统将更加注重导航导引控制技术对环境变化的适应性。通过集成先进的传感器和人工智能算法,系统能实时响应环境变化,如风速、风向、地形等,确保物资投送精准可控。一是发展恶劣环境下的自主导航技术。融合人工智能视觉导航的组合导航技术能解决恶劣条件下空投起始点的问题,提高无伞空投在恶劣环境下的自主导航和精准投送能力。二是发展基于在线系统辨识的分段航迹规划技术。通过实时监测和预测空投物的轨迹,提高导引算法的鲁棒性和通用性。三是开发更为精确的导航和导引算法,特别是多源信息融合技术,如惯性导航、卫星导航、视觉导航等,以提高物资投送精度。

3.3 锚定智能飞行控制技术,开发无人机群自主空投平台

未来无人机空投作战是无伞空投发展的重大趋势,利用无人机群空投弹药具有的成本低、快速部署、精确打击等优势,无人机可执行侦察和协同突击等任务,能最大程度避免人员伤亡,成为未来无人作战系统的重点研究方向。一是利用先进的无人机飞行控制技术,实现自主规划空投路径。通过集成环境感知、地图建模、路径规划等技术,无人机可自动规划精确、安全的空投路径,并具备实时调整路径的能力,以应对复杂多变的战场环境。二是智能化空投系统将结合机器学习技术,通过多传感器融合算法自主决策投放时机。无人机空投系统能自主计算环境感知数据,识别目标地点环境及障碍物,并基于任务需求、地貌、风速等因素自主选择最佳的投送时机。三是发展无人

机群协同控制技术, 组建无人机平台编队进行物资投送。无人机群被认为是一种能颠覆未来战场形势的作战手段, 采用多架无人机协同方式, 无人机之间通过通信进行信息共享, 扩大对环境态势的感知, 实现协同任务分配、协同搜索、协同侦察与攻击, 能有效提高无人机集群的生存能力和整体作战效能。

4 结语

无伞空投因其在复杂地形和环境下的高效性和便捷性, 打通了物资保障的“最后一公里”。无伞空投作为应急救援领域重要的投送手段, 具有广阔的发展前景和重要的应用价值。笔者首先对无伞空投准备阶段技术进行了梳理和分类, 同时对国外环境监测技术、精准投放预测与计算技术和无人机自主规划相关技术研究进展进行了深入分析, 并提出了无伞空投准备阶段技术的未来发展趋势为注重微型环境监测传感器技术、改进导航导引控制技术、锚定智能飞行控制技术以及加快无人机群自主空投平台的研究应用, 通过对国外无伞空投准备阶段技术发展趋势的分析, 期望推动我国无伞空投的发展。

参考文献:

- [1] 史永胜, 孙文泽. 纤维混杂铺层对无伞空投箱抗冲击性的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(1): 300-308.
SHI Y S, SUN W Z. Effects of Fiber Hybrid Layer on Impact Resistance of Airdrop Box Without Parachute[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(1): 300-308.
- [2] SARIGUL M M, GIONFRIDDO M P. Technology Demonstration of a 1-ton Single Use Disposable Glider[C]// AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego, California:AIAA, 2019: 1-9.
- [3] 张宇婷, 耿小凯, 任春华, 等. 无伞空投储液罐的高空跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2023, 43(1): 66-74.
ZHANG Y T, GENG X K, REN C H, et al. Simulation Analysis of Liquid Storage Tank for Free Drop[J]. Packaging Engineering, 2023, 43(1): 66-74.
- [4] 贾山, 高翔宇, 陈金宝, 等. 低空无伞无损空投包装设计及其自稳和缓冲性能验证[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(2): 1-14.
JIA S, GAO X Y, CHEN J B, et al. Design of Low Altitude Free Drop Packaging and Verification of Its Self-stability and Cushioning Performance[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2022, 43(2): 1-14.
- [5] 谢如恒, 南英, 赵正戴. 低空无伞空投载机辅助决策方案研究[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(10): 137-142.
XIE R H, NAN Y, ZHAO Z D. Research on Auxiliary Decision Scheme for Parachute-Free Airdrop at Low Altitude[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(10): 137-142.
- [6] 习赵军, 胡麟, 李毅超, 等. 聚氨酯/聚乙烯水袋无伞空投跌落仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 211-215.
XI Z J, HU L, LI Y C, et al. Numerical Investigation of Free Drop of Polyurethane/Polyethylene Water Bag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 211-215.
- [7] 兰文昌, 王中阳, 王申奥. 无伞精确空投模式下飘带试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 188-193.
LAN W C, WANG Z Y, WANG S A. Experimental Study on Ribbons in Parachuteless Precise Airdrop Mode[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 188-193.
- [8] 李吉, 曹雪霖, 李艳莹, 等. 基于无人机运输的应急医学救援药材保障系统论证设计[J]. 医疗卫生装备, 2023, 44(6): 14-18.
LI J, CAO X L, LI Y Y, et al. Demonstration and Design of UAV-Based Medicine Support System for Emergency Medical Rescue[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2023, 44(6): 14-18.
- [9] 邵大帅, 高惠中, 郭洁. 浅谈建设直升机空投油料保障模式的必要性[J]. 中国储运, 2017(2): 133-134.
SHAO D S, GAO H Z, GUO J. The Necessity of Building Helicopter Airdrop Oil Support Mode Is Discussed[J]. China Storage & Transport, 2017(2): 133-134.
- [10] 易方, 孟浩龙. 新型空投橡胶油囊的设计[J]. 橡胶工业, 2018, 65(10): 1146-1149.
YI F, MENG H L. Design of a New Type of Airdrop Rubber Fuel Drum[J]. China Rubber Industry, 2018, 65(10): 1146-1149.
- [11] 李二飞. 无人机在消防救援中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2024(7): 40-43.
LI E F. Research on the Application of Unmanned Aerial Vehicle in Fire Rescue[J]. China Plant Engineering, 2024(7): 40-43.
- [12] 王玉鑫, 姜旭, 李晓海, 等. 应急救援用无伞空投包装通用技术条件标准研究[J]. 机电产品开发与创新, 2020, 33(4): 34-36.
WANG Y X, JIANG X, LI X H, et al. Standards Practice for General Technology Conditions of Umbrella-Free Airdrop Packaging[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2020, 33(4): 34-36.
- [13] KLINKMUELLER K, WIECK A J, HOLT J K, et al. Airborne Delivery of Unmanned Aerial Vehicles Via Joint Precision Airdrop Systems[C]// AIAA Scitech

- 2019 Forum, San Diego, California, 2019: 2285-2298.
- [14] JACKSON S, RICCOBONI N A, RAHIM A, et al. Autonomous Airborne Multi-Rotor UAS Delivery System[C]// 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, Athens, Greece, 2020: 702-708.
- [15] GALKIN A A, TIMOSHENKOV A S, ERKIN P V, et al. Potential Application of Mems-based Inertial Aids in Automatic Control System of Airdrop Platforms: Experimental Study[J]. Gyroscopy and Navigation, 2023, 14(3): 234-243.
- [16] WARD S, FIELDS T. Development and Viability of an Inverted Descent Quadrotor for Precision Aerial Delivery[C]// AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego, CA & Virtual. AIAA, 2022: 2022-2480.
- [17] 赵西友, 李彦平, 王静伟, 等. 滚塑无伞空投储水罐的设计与分析[J]. 中国塑料, 2019, 33(1): 111-115.
ZHAO X Y, LI Y P, WANG J W, et al. A Design and Analysis of Rotationally Molded Water Storage Tank in Free Drop[J]. China Plastics, 2019, 33(1): 111-115.
- [18] 张文武, 张丹, 王珊珊, 等. 吸能材料缓冲性能评价方法综述[J]. 包装工程, 2023, 43(5): 143-151.
ZHANG W W, ZHANG D, WANG S S, et al. Review of Evaluation Methods for Cushioning Performance of Energy Absorbing Materials[J]. Packaging Engineering, 2023, 43(5): 143-151.
- [19] 赵西友, 王宏, 许涛, 等. 无伞空投缓冲包装材料及技术研究[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 54-57.
ZHAO X Y, WANG H, XU T, et al. Free Drop Buffering Packing Material and Technology[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 54-57.
- [20] 石宏涛, 郭洁, 王诗雨晴. 弹药无伞空投包装技术研究[J]. 中国军转民, 2024(10): 22-24.
SHI H T, GUO J, WANG S Y Q. Research on Packaging Technology of Ammunition Airdrop Without Parachute[J]. Defense Industry Conversion in China, 2024(10): 22-24.
- [21] 张伟, 陈国明, 黄威, 等. 空投变掠翼滑翔炸弹弹迹优化[J]. 飞行力学, 2022, 40(6): 39-43.
ZHANG W, CHEN G M, HUANG W, et al. Trajectory Optimization of Air-dropped Variable-sweep Wing Glide Bombs[J]. Flight Dynamics, 2022, 40(6): 39-43.
- [22] 张宇. 空投火箭炮着陆缓冲过程动力学分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
ZHANG Y. Dynamic Analysis of Landing Buffer Process of Air-Dropped Rocket Launcher[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.
- [23] 温志文, 杨智栋, 王力竞. 空投鱼雷系统建模与空中弹道仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(5): 63-66.
- WEN Z W, YANG Z D, WANG L J. Modeling of the Air-Dropped Torpedo System and the Simulation Research of the Air Trajectory[J]. Journal of Projectiles, 2019, 39(5): 63-66.
- [24] 刘建兵. 悬停空投鱼雷攻击水下目标投雷点计算方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(4): 87-90.
LIU J B. Calculation Method for Torpedo Release Point of Hovering Aerial Torpedo Attacking Underwater Target[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2019, 2(4): 87-90.
- [25] 孙旺, 南英, 曾冠霖, 等. 无伞空投影响因素敏感性 & 载机安全性分析[J]. 计算机仿真, 2021, 38(4): 35-40.
SUN W, NAN Y, ZENG G L, et al. Analysis of Sensitivity of Influencing Factors for Parachute-Free Airdrop and Safety for Aircraft[J]. Computer Simulation, 2021, 38(4): 35-40.
- [26] 赵正戴, 南英, 谢如恒. 无伞空投体自身特性对落点精度的敏感性分析[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(6): 68-73.
ZHAO Z D, NAN Y, XIE R H. Sensitivity Analysis of Landing Accuracy of Low Altitude Parachute-Free Airdrops[J]. Command Control & Simulation, 2019, 41(6): 68-73.
- [27] 郭洁, 蒋明明, 林德鑫. 自由空投系统物资匹配分析对我国的启示[J]. 机械工程, 2023, 5(7): 103-105.
GUO J, JIANG M M, LIN D X. Enlightenment of Material Matching Analysis of Free Airdrop System to China[J]. Mechanical Engineering, 2023, 5(7): 103-105.
- [28] 姜涛, 鲁航, 田德宇. 精确空投系统研究进展及趋势[J/OL]. 现代防御技术, 2024: 1-8.(2024-05-16)[2025-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3019.tj.20240516.0655.002.html>.
- JIANG T, LU H, TIAN D Y. Research Progress and Trend on Precision Airdrop System[J/OL]. Modern Defence Technology, 2024: 1-8. (2024-05-16)[2025-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3019.tj.20240516.0655.002.html>.
- [29] WILHELM A, LEFERING R. Helicopter Hoist Operations in Difficult Nonalpine Terrain[J]. Air Medical Journal, 2021, 40(4): 242-250.
- [30] BOTELHO A, MARTINZE M, RECUPERO C, et al. Design of the Landing Guidance for the Retro-propulsive Vertical Landing of a Reusable Rocket Stage[J]. CEAS Space Journal, 2022, 14(3): 1-14.
- [31] 崔殿瑞, 王慧娟. 基于无人机遥感测绘的 GIS 数据处理技术[J]. 自动化应用, 2024, 65(11): 12-14.
CUI D R, WANG H J. Data Processing Technology of

- GIS Based on UAV Remote Sensing Surveying and Mapping[J]. Automation Application, 2024, 65(11): 12-14.
- [32] 王东振, 张岳, 赵宇, 等. 基于 RRT-Dubins 的无人机航迹优化方法[J]. 兵工学报, 2024, 45(8): 2761-2773.
WANG D Z, ZHANG Y, ZHAO Y, et al. A UAV Trajectory Optimization Method Based on RRT-Dubins[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(8): 2761-2773.
- [33] TAVAN S, DIETZ A, SORENSON P, et al. Advanced Sensors for Precision Airdrop[C]// 20th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Seattle, Washington. AIAA, 2009: 2951-2963.
- [34] YAKIMENKO O, SLEGERS N, TIADEN R. Development and Testing of the Miniature Aerial Delivery System Snowflake[C]// 20th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Seattle, Washington. AIAA, 2009: 2980-2995.
- [35] MEIER D C, FIORINO S T. Application of Satellite- and NWP-Derived Wind Profiles to Military Airdrop Operations[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2016, 55(10): 2197-2209.
- [36] HERRMANN T A, WARD M B, COSTELLO M, et al. Utilizing Ground-Based LIDAR for Autonomous Airdrop[C]// AIAA Aerodynamic Decelerator Systems (ADS) Conference. Daytona Beach, Florida. AIAA, 2013: 1387-1400.
- [37] PRAMOD A, SHANKARANARAYANAN H, RAJ A A B. A Precision Airdrop System for Cargo Loads Delivery Applications[C]// 2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN). Puducherry, India: IEEE, 2021: 1-5.
- [38] ARANGALA W C S. A Model for Precision Aerial Drops From UAVs[D]. Colombo:University of Colombo School of Computing, 2022: 1-45.
- [39] HII M S Y, COURTNEY P, ROYALL P G. An Evaluation of the Delivery of Medicines Using Drones[J]. Drones, 2019, 3(52): 1-20.
- [40] MATHISEN S G, LEIRA F S, HELGESEN H H, et al. Autonomous Ballistic Airdrop of Objects from a Small Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle[J]. Autonomous Robots, 2020, 44(5): 859-875.
- [41] MEINCKE P A. Cargo Handling, Transport and Logistics Processes in the Context of Drone Operation[M]// Automated Low-Altitude Air Delivery. Cham: Springer International Publishing, 2021: 205-243.
- [42] SCHOPFERER S, DONKELS A. Trajectory Risk Modelling and Planning for Unmanned Cargo Aircraft[M]// Automated Low-Altitude Air Delivery. Cham: Springer International Publishing, 2021: 353-391.
- [43] IVANOVIC A, ORSAG M. Parabolic Airdrop Trajectory Planning for Multirotor Unmanned Aerial Vehicles[J]. IEEE Access, 2022, 10: 36923.
- [44] JANA P, JANA D. AutoDrone: Shortest Optimized Obstacle-Free Path Planning for Autonomous Drones[C]// Proceedings of International Conference on Computational Intelligence, Data Science and Cloud Computing. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 3-15.
- [45] 片岡,佐京,鈴木. 風リスクを考慮した自律ドローンの軌道計画に関する研究[J]. 日本ロボット学会誌, 2022, 40(10): 915-923.
SAKYO K, SATOSHI S. A Study on Path Planning for Autonomous Drones Considering Wind Risk[J]. Journal of the Robotics Society of Japan Volume, 2022, 40(10): 915-923.
- [46] SKYE M, DANIEL S, OLIVER S, et al. Visual Modeling System for Optimization-Based Real-Time Trajectory Planning for Autonomous Aerial Drones[C]// 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Big Sky, MT, USA. IEEE, 2022: 1-9.
- [47] GOPI G, ANWAR H. Path Planning for Autonomous Drones: Challenges and Future Directions[J]. Drones, 2023, 7(3): 1-18.
- [48] VOLKAN Y P, PERIHAN P. An Efficient Path Planning Approach for Autonomous Multi-UAV System in Target Coverage Problems[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2024, 96(5): 690-706.