

基于 POI 数据的城市物流无人机需求与选址优化策略

连孜轩¹ 曹卉¹ 闫婷婷² 袁硕³

1 华北理工大学 应急管理与安全工程学院, 河北唐山, 063210;

2 华北理工大学 理学院, 河北唐山, 063210;

3 华北理工大学 人工智能学院, 河北唐山, 063210;

摘要: 随着物流业务、同城配送、外卖等行业蓬勃发展, 无人机运输逐渐成为物流行业新兴力量。当前, 市场需求、技术发展以及政策完善为无人机物流带来广阔前景。然而, 无人机物流要实现成熟应用, 仍面临诸多挑战, 其中无人机性能限制以及城市内起降点合理选址是重要问题。为更好地推动城市无人机物流发展, 本文探究无人机需求的生成以及起降点选址问题。在需求生成方面, 本文依据兴趣点(Point of Interest, POI)数据, 综合考虑市场需求、需求点位置和重量等因素, 提供需求生成方案; 在起降点选址环节, 基于无人机需求以及城市特点, 以固定路网模式为基础, 采用带权重的 K-means 聚类分析法进行起降点选址, 并利用 Voronoi 图对无人机配送范围进行选址分区。

关键词: 无人机物流; 最后一公里; 兴趣点数据; 起降点选址

DOI: 10.69979/3041-0673.25.01.055

随着我国电商业务、同城配送、外卖等行业的迅猛发展, 无人机凭借其高效率和强灵活性, 逐渐成为物流行业的新兴力量。“最后一公里”配送也成为物流行业亟待发展的领域。与此同时, 技术的不断进步也推动了无人机在物流领域的应用。2017年, 京东、顺丰等电商企业先后完成了无人机运送包裹的首次飞行测试, 并实现了在特定区域的常态化运营。2024年1月1日, 《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》正式实施, 我国无人机产业由此迈入规范化发展的新阶段^[1]。

市场对无人机物流的巨大需求、技术的飞速发展以及政策法规的逐步完善, 为无人机物流带来了广阔的发展前景。然而, 要实现物流无人机的成熟应用, 仍面临诸多亟待解决的问题。一方面, 物流无人机的应用模式丰富多样, 在对其低空飞行进行管控时, 必须充分结合其运营模式和飞行方式; 另一方面, 鉴于无人机存在低空坠落的安全隐患, 在起降点选址时, 不仅要考虑性能和经济因素, 安全因素同样至关重要。

国内外学者也对无人机物流的应用模式、起降点选址等方面进行了探索研究。在无人机物流的应用模式方面, 早在2013年12月, 亚马逊公司就已经尝试将Prime Air的无人机运用到物流配送中, 在国内京东物流也实施利用无人机送货的企业模式以争夺物流市场^[2], 2017年, 苏宁物流就已经在浙江等地开通了无人机多条航线, 用户在家即可收到投递的包裹, 使无人机配送常态

化运营迈进了一大步。在起降点选址方面, 主要围绕需求覆盖、成本优化、空域限制等因素展开。Nida Syed等(2017)运用K-means聚类分析法, 探究不同规模下无人机地面基础设施选址问题^[3]; Seyed Mahdi Shavarania等(2019)提出了基于层次设施选址问题(Hierarchical Facility Location Problem)的无人机配送系统优化模型, 以总成本最小化为目标, 考虑无人机续航能力和包裹吞吐量限制^[4]; 钱欣悦(2021)引入空域环境限制条件, 建立了符合实际的物流无人机起降点选址分配模型^[5]; 冯棣坤(2022)提出了基于完全覆盖的城区物流无人机起降点布局规划方法, 综合考虑建设成本、运输成本、仓储成本和维护成本, 同时引入空域限制和无人机性能约束^[6]; 高翔等(2023)研究了无人机飞行状态与环境温度对无人机续航能力的影响, 建立了无人机异地起降选址模型, 并运用改进的二进制粒子群算法进行求解^[7]; 张洪海, 冯棣坤, 张晓玮, 等(2022)进一步综合考虑禁飞区限制、无人机性能条件、容需匹配等约束, 构建了以总经济成本最小和客户满意度最高为目标的整数规划模型^[8], 更好地适应不同需求密度区域的物流配送需求。

然而, 目前对无人机物流的研究, 对无人机与其他运输工具结合的运输模式研究较多, 仅使用无人机的运输研究较少; 在对无人起降点选址方面, 大部分文献都考虑到了无人机的里程限制以及负荷限制, 而从一开始

的选址、路网规划设置方面考虑较少。故本文主要从无人机需求的生成方式上出发,根据兴趣点POI(Point of Interest)数据,考虑到具体的市场需求以及实际情景中各个需求点所在的位置以及重量,提供了需求生成和选址分区体系化技术方法。

1 基于需求的起降点选址方法

根据现阶段“最后一公里”无人机配送的发展,本文针对城市场景中的打造的“综合货运枢纽—城市配送中心—城市配送末端节点”的末端配送环节,结合目前无人机以及性能的应用,将城市范围划分为若干区域,并对其中某一区域进行物流无人机的起降点选址的研究。

本文构建了包括需求生成和起降点选址及分区两个阶段的技术体系,整体设计思路分为二部分:首先,在无人机需求生成阶段,主要考虑了数据的来源以及数据的生成规则;其次,在无人机起降点选址以及分区阶段,本文创新性地提出了固定路网模式,并采用了带权重的K-means聚类分析法进行选址以及Voronoi图进行分区。

1.1 无人机需求生成方法

由于无人机在“最后一公里”配送中具有诸多优势,如配送速度快、环境污染小等,因此在小件快递、同城配送和外卖等领域具有广阔的应用前景,而进一步考虑到无人机配送距离有限、续航时间短以及荷载较小的特点,本文结合POI数据即对空间实体位置的描述数据,其能够从一定程度上反映城市空间的生产与生活活力、无人机性能以及未来市场需求,按照一定的规则生成包含需求起点与终点地理位置、需求质量以及需求类型的无人机配送需求,从而完善无人机“最后一公里”的配送体系。具体规则如下:

现阶段,城市无人机物流主要需求包括物流末端配送(物流站点与住宿住宅、办公区域之间的快递投递)、外卖配送(包括同城跑腿、餐饮外卖等)以及医疗物资、应急资源等的短距离配送,因此本文以以下规则生成无人机的需求:无人机物流需求中物流末端配送占20%、外卖配送占60%、医疗物资、应急资源配送占20%。此外,无人机物流主要起降点为快递站点、住宿住宅、商业区以及办公区域,其具体分配如表1所示。

表1 需求生成表

起点 终点	快递站 点	住宿住 宅	商业区	办公区 域
----------	----------	----------	-----	----------

快递站点	0%	0%	5%	10%
住宿住宅	0%	0%	0%	10%
商业区	5%	20%	0%	20%
办公区域	10%	10%	0%	10%

其中,快递站点到办公区域之间的10%占比为物流末端配送占5%,应急物资配送占5%;反之亦然。

(2)根据无人机的续航时间的性能,在需求距离上,保证75%的需求在3km以内,其余25%的需求在3km以外。

(3)根据无人机载重限制的性能,在需求质量上,结合日常实际情况,使无人机的需求一般重量在0.3-4kg的范围内。

1.2 起降点选址及分区方法

本文以重量作为权重,以带权重的K-means聚类分析法进行起降点的选址。在确定无人机起降点选址后,为使每个无人机起降点负责的范围更加明晰以及避免某些需求选择到不合适的无人机起降点,在已有起降点的基础上作Voronoi图;对于跨区域的需求,需要将其起点或者终点改为无人机起降点所在的位置,与其他区域进行联合配送。

1.2.1 带权重的K-means聚类分析法

根据前文描述,算法的具体方法如下:

初始化:与标准K-means一样,通过肘部法选择k个初始聚类中心,并选择每个需求点的需求重量为权重进行初始化。

(2)迭代更新:遍历每个数据点 x_i ,计算其到每个聚类中心 c_j 的加权欧氏距离, $w_{i,k}$ 是 x_i 在维度k上的权重。

$$D(x_i, c_j) = \sqrt{\sum_{d=1}^D w_{i,k} (x_i[d] - c_j[d])^2} \quad (1)$$

遍历每个聚类中心 c_j ,计算属于该聚类的所有数据点的权重之和 $\sum_w = \sum_{i: \text{labels}[i]=j} w_i$ 以及加权数据点之和 $\sum_x = \sum_{i: \text{labels}[i]=j} w_i \cdot x_i$,当满足 \sum_x 大于0时,则更新聚类中心。

$$c_j = \frac{\sum_x}{\sum_w} \quad (2)$$

最后,通过公式(2),得到每个聚类更合理的中心位置。

1.2.2 基于Voronoi图的分区方法

在确定无人机起降点选址后,为使无人机需求能够选择到距离最近的起降点以及使每个无人机起降点负责的范围更加明晰,需要对整个区域进行分割。Voronoi

i图是一种基于距离的平面分割方法，用于将平面划分为若干区域。假设在平面上有 n 个点，这些点被称为生成元，对于每个生成元 p_i ，其对应的 Voronoi 区域 $V(p_i)$ 定义为：对所有平面上的点 x ，使得 x 到 p_i 的欧氏距离小于 x 到其他任何生成元 p_j 的欧氏距离。

$$V(p_i) = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid |x - p_i| < |x - p_j|, \forall j \neq i\} \quad (3)$$

其中， $|x - p_i|$ 表示点 x 和生成元 p_i 之间的欧氏距离。

平面上每个生成元以相同的速度向外扩展，形成一个圆形区域。当这些圆形区域相遇时，它们的边界就形成了 Voronoi 图的边界。最外围的生成元形成的区域则没有边界限制，如图 1 所示。

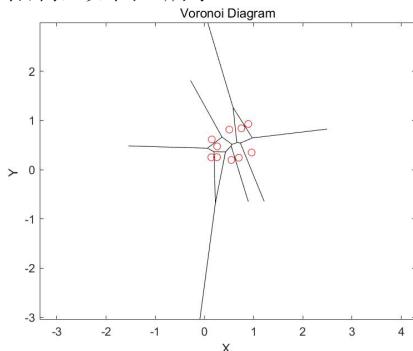


图 1 Voronoi 图示意图

2 实例验证分析

2.1 无人机需求生成

本文以 2023 年 12 月份唐山市的 POI 数据为基础，在唐山市路南区、路北区以及开平区在经度为 117.97-118.37，纬度为 39.48-39.80 范围内，筛选出性质为物流速递、餐饮服务、公司企业以及住宿住宅的点，其中性质为物流速递的点有 734 个；性质为餐饮服务的点有 7798 个；性质为公司企业的点有 4418 个；性质为住宿住宅的点有 2297 个。

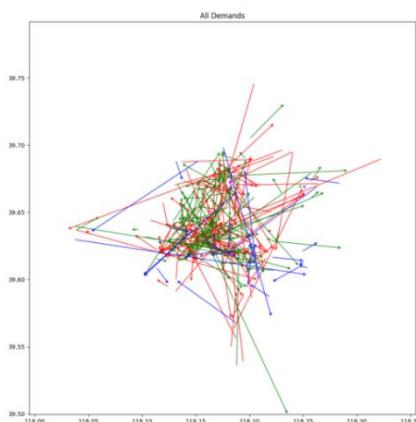


图 2 无人机需求图

在已有需求点地理位置以及性质的基础上，按照前文提到的规则，生成了 300 个需求，如图 2 所示。图中红色为物流末端配送、绿色为外卖配送、蓝色为医疗物资、应急资源等的短距离配送，箭头是从各个需求的起点指向终点。生成的无人机需求包含的信息有起点和终点的地理位置以及性质、距离、重量。

2.2 起降点选址及分区

本文采用带权重的 K-means 聚类分析法进行起降点选址，并通过肘部法确定聚类中心的数量以及无人机起降点的位置，最后通过 Voronoi 图划分各个起降点的服务范围，结果如图 3 所示。

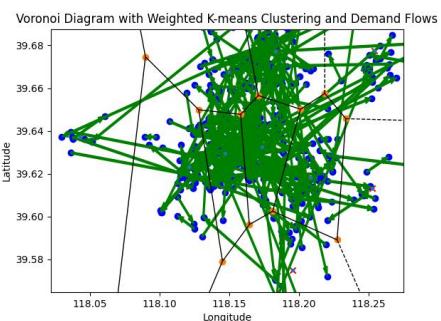


图 3 起降点选址及分区示意图

由图 3 可以看出，根据 K-means 聚类分析得到了 11 个聚类中心将该范围主要划分为 10 个区域，蓝色点为起降址选点，绿色为无人机物流路线。

3 结论

本文基于兴趣点 POI 数据，从无人机需求生成方式切入，综合考虑具体市场需求、需求点位置与重量，提供了需求生成和选址分区体系化技术方法，有望为无人机物流的进一步发展提供新思路与技术支撑，助力解决当前无人机物流发展中的部分关键问题，推动该领域向更高效、更安全、更智能的方向发展。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例 [EB/OL]. 北京: 国务院、中央军委, (2023-6-28) [2024-05-27]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XGK/FLFG/202401/P020240115348470011000.pdf>.
- [2] 伊张芸. 农用无人机的发展现状与思考 [J]. 现代农机, 2017(5):14-16.
- [3] SYED N, RYE M, ADE M, et al. Preliminary considerations for odm air traffic management ba

sed on analysis of commuter passenger demand and travel patterns for the silicon valley region of California[C]//17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. 2017: 3082.

[4]任新惠, 王柳. 即时配送下无人机全自动机场分区选址模型[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(10): 266-272.

REN Xinhui, WANG Liu. Location Model of Automatic Airport Partitioning for Unmanned Aerial Vehicles Under Urban Instant Delivery[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(10): 266-272.

[5]钱欣悦. 城区物流无人机起降场点协同选址布局优化模型研究[D]. 南京航空航天大学, 2021. DOI: 10.27239/d.cnki.gnhhu.2021.001144.

[6]冯棣坤. 城区物流无人机起降场点布局规划方法研

究[D]. 南京航空航天大学, 2022. DOI: 10.27239/d.cnki.gnhhu.2022.001383.

[7]高翔, 张明, 李松锐等. 基于低空救援的无人机起降点选址问题研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(5): 1-13.

GAO Xiang, ZHANG Ming, LI Songrui, et al. Research on Location of Landing Point of UAV Based on Low-altitude Rescue[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2023, 47(5): 1-13.

[8]张洪海, 冯棣坤, 张晓玮, 等. 城市物流无人机起降点布局规划研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(03): 207-214. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.03.023.

作者简介: 连孜轩(2005年08月), 女, 汉, 河北省邢台市人, 在读本科, 研究方向: 城市物流无人机使用。