

无人快递车中的环境感知技术研究

周求

(天津英增贸易有限公司, 天津 300499)

摘要:本文全面梳理无人快递车主流环境感知技术体系,逐一剖析激光雷达、视觉摄像头、毫米波雷达、超声波传感器四大单一感知技术的工作原理、技术架构、性能参数、适用场景与优缺点,深入研究多传感器融合感知的核心算法、融合架构与实现流程。结合京东、美团、Nuro等头部企业无人快递车的真实落地案例,辅以2025年无人配送行业权威统计数据与市场格局分析,系统总结当前无人快递车环境感知技术应用中的核心技术瓶颈、场景适配难题与工程落地短板,针对性提出技术优化方案,并预判未来技术迭代趋势与行业发展方向。本文研究可为无人快递车感知系统优化、工程落地应用、行业技术标准化建设提供理论支撑与实践参考,同时为智慧物流无人设备技术升级、中级工程技术应用研究提供可靠依据。

关键词:无人快递车; 环境感知; 多传感器融合; 激光雷达; 视觉感知; 毫米波雷达; 智慧物流

Research on Environmental Perception Technology in Unmanned Delivery Vehicles

ZHOU Qiu

(Tianjin Yingzeng Trading Co., Ltd., Tianjin 300499, China)

Abstract: This paper comprehensively reviews the mainstream environmental perception technology systems for autonomous delivery vehicles, systematically analyzing the working principles, technical architectures, performance parameters, application scenarios, and advantages and disadvantages of four primary sensing technologies: LiDAR, visual cameras, millimeter-wave radar, and ultrasonic sensors. It delves into core algorithms, fusion architectures, and implementation processes of multi-sensor fused perception. Drawing on real-world deployment cases from leading companies such as JD.com, Meituan, and Nuro, and supported by authoritative 2025 industry statistics and market analysis in autonomous delivery, the study systematically summarizes current technological bottlenecks, scenario adaptation challenges, and engineering implementation gaps in environmental perception for autonomous delivery vehicles. Targeted optimization strategies are proposed, along with predictions on future technological evolution and industry development trends. The research provides theoretical foundations and practical references for optimizing perception systems, facilitating engineering deployment, and advancing industry-standardization efforts in autonomous delivery vehicles, while also offering reliable support for upgrading intelligent logistics equipment and advancing applied engineering research.

Key words: Unmanned delivery vehicle; environmental perception; multi-sensor fusion; LiDAR; visual perception; millimeter-wave radar; smart logistics

1 引言

1.1 研究背景

在数字经济、智慧物流与新基建战略的全面推进下,我国快递物流行业迎来高速发展期,快递业务量连续多年稳居全球首位。据《2025年中国智慧物流行业发展蓝皮书》统计,2025年我国快递业务总量突破1300亿件,末端配送订单日均超3.5亿单,传统人工配送模式面临人力成本攀升、配送时效不均、末端覆盖不足、恶劣天气作业受限等多重难题,末端物流智能化转型迫在眉睫。无人快递车作为低速自动驾驶智能设备,具备全天候作业、低运营成本、高配送效率、零人工干预的核心优势,可精准适配最后一公里末端配送场景,有效填补人工配送短板,已成为智慧物流转型升级的核心突破口。

无人快递车自动驾驶系统主要由环境感知、决策规

划、运动控制三大核心模块构成,其中环境感知模块是整车自动驾驶的“感知眼睛”,是决策规划与运动控制的基础前提。城市末端配送场景具备路况复杂、行人密集、非机动车混杂、障碍物随机、光照天气多变等特征,对无人快递车的环境感知能力提出了极高要求。单一感知传感器受物理特性限制,无法兼顾全天候、全场景、高精度感知需求,例如摄像头易受光照、雨雪天气干扰,激光雷达成本偏高、无速度感知能力,毫米波雷达分辨率有限,超声波传感器探测距离较短。

在此背景下,融合多类感知传感器、构建多模态环境感知体系,成为无人快递车技术迭代的核心方向。深入研究各类感知技术的工作机理、应用特性与融合算法,剖析行业落地案例与市场现状,梳理技术瓶颈与优化路径,对提升无人快递车行驶安全性、作业稳定性、场景适配性,

推动末端物流智能化、标准化、规模化落地具有重要的工程价值与行业意义。同时,本研究贴合智能物流工程、自动驾驶工程一线应用实际,可为中级工程技术人员开展智能设备技术研究、工程优化与落地应用提供系统的理论与实践支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

国外无人配送车感知技术研究起步较早,以美国、欧洲为核心代表,技术路线偏向高精度、高可靠性、全场景适配,主打L4级低速自动驾驶感知体系落地。美国Nuro公司作为全球无人配送赛道标杆企业,率先搭建“固态激光雷达+高清成像毫米波雷达+视觉摄像头”的多传感器融合感知架构,摒弃传统机械激光雷达,采用小型化固态激光雷达,大幅提升设备稳定性与环境适配性,可实现恶劣天气下远距离小目标精准感知,适配城市开放道路配送场景。欧洲企业侧重感知技术的安全性研究与标准化研究,重点优化传感器抗干扰算法与场景适配模型,针对欧洲城市窄路、慢行交通特征,优化近距离障碍物感知与低速避障感知精度,形成了成熟的感知技术落地标准体系。整体来看,国外无人快递车感知技术优势在于传感器硬件精度高、融合算法成熟、场景适配性强,但存在设备成本高、本土化场景适配不足、规模化落地难度大的问题。[1-3]

1.2.2 国内研究现状

国内无人快递车产业依托庞大的末端配送市场,实现快速迭代发展,形成了“性价比优先、场景适配、快速迭代、规模化落地”的本土化技术路线。以京东、美团、菜鸟为代表的头部企业,深耕城市社区、园区、高校等本土化复杂场景,持续优化感知技术体系,形成了适配国内路况的感知方案。京东第六代无人配送车搭载感知大模型与点云视觉融合技术,实现感知范围19倍扩容、感知性能3倍提升;美团无人车采用“1主2辅”激光雷达布局+多摄像头+毫米波雷达融合方案,实现深圳城中村复杂路况98%通过率。

国内高校与科研机构同步开展技术研究,重点突破多传感器融合算法、复杂场景语义感知、低算力端侧部署等核心技术,有效降低感知系统硬件成本,提升算法落地适配性。但整体而言,国内无人快递车感知技术仍存在短板:复杂极端场景感知鲁棒性不足、多传感器时空同步精度有限、老旧场景感知盲区较多、高端感知芯片与核心传感器依赖进口,制约了行业规模化高质量发展。[4,5]

2 无人快递车环境感知技术整体概述

2.1 环境感知系统核心定义与功能

无人快递车环境感知系统是依托各类车载传感器、数据采集模块、算法处理单元,实时获取车辆周边环境信息,完成环境建模、目标检测、语义识别、状态预判的核心车载系统,是无人快递车实现自主导航、避障行驶、智能制动、路径调整的基础核心。区别于高速自动驾驶车

辆,无人快递车属于低速自动驾驶设备(最高行驶速度 $\leq 30\text{km/h}$),作业场景以城市低速道路、封闭园区、社区窄路为主,感知系统更侧重近距离高精度感知、小目标识别、复杂动态障碍物预判、全天候稳定作业四大核心能力。

无人快递车环境感知系统核心功能主要包含四项:一是环境信息采集,通过各类传感器实时采集周边路况、障碍物、行人、非机动车、交通标识、路面状况等多维信息;二是目标检测与分类,通过算法识别区分静态障碍物(路沿、石墩、护栏、静止车辆)与动态障碍物(行人、电动车、行驶车辆),完成目标分类、测距、测速;三是场景语义解析,识别车道线、红绿灯、路口、斑马线、禁行区域等场景语义信息,构建实时环境语义模型;四是风险预判与数据输出,实时分析环境风险,将感知数据传输至决策规划模块,为车辆避障、减速、停车、变道等动作提供数据支撑。[6]

2.2 环境感知系统整体架构

无人快递车环境感知系统采用“硬件感知层—数据预处理层—算法融合层—决策输出层”四层递进架构,整体架构逻辑清晰、层级分明,可实现环境信息从采集、处理、融合到输出的全流程闭环处理。

第一层为硬件感知层,是系统底层基础,主要搭载激光雷达、高清摄像头、毫米波雷达、超声波传感器四大核心感知硬件,负责全方位采集车辆周边三维点云数据、图像像素数据、速度距离数据、近距离障碍物数据,实现360°无死角环境信息覆盖;第二层为数据预处理层,通过滤波算法、校准算法、去噪算法,剔除原始数据中的噪声、冗余、异常数据,完成多源数据的时间同步与空间对齐,提升原始数据精度;第三层为算法融合层,依托多传感器融合算法,整合各类传感器优势,弥补单一感知短板,完成高精度目标检测、语义分割、轨迹预测;第四层为决策输出层,将融合后的高精度感知数据传输至自动驾驶决策模块,支撑车辆路径规划、避障控制、速度调节等自主作业行为。[7]

2.3 环境感知技术分类与适配标准

根据传感器硬件类型与感知原理,无人快递车环境感知技术可分为被动感知与主动感知两大类。被动感知以视觉摄像头为核心,依托环境自然光采集图像信息,具备语义识别能力、成本低、分辨率高,但抗干扰能力弱;主动感知包含激光雷达、毫米波雷达、超声波传感器,通过设备主动发射探测信号获取环境数据,不受外界光照影响,抗干扰能力强,适配全天候作业场景。[8]

结合无人快递车低速作业、场景复杂、成本可控的行业需求,行业形成了明确的感知技术适配标准:一是近距离(0-50m)高精度障碍物感知,保障窄路通行、近距离避障安全;二是动态目标实时测速、轨迹预判,适配行人和非机动车无序穿梭场景;三是雨雪、强光、夜间等复杂天气稳定感知,保障全天候作业;四是低算力、低功耗适配,适配车载嵌入式终端部署需求;五是低成本、小型

化、高可靠性，满足规模化量产落地需求。各类感知技术需围绕上述标准完成选型与适配优化。

3 无人快递车单一环境感知技术原理与应用研究

3.1 激光雷达感知技术

3.1.1 工作原理

激光雷达 (LiDAR) 是无人快递车核心高精度主动感知传感器，核心工作原理为飞行时间测距法 (ToF)，通过激光发射器主动发射高频激光束，激光束接触周边障碍物后反射，接收器接收反射激光信号，通过计算激光发射与接收的时间差，结合光速参数精准测算传感器与障碍物的距离，同时结合激光发射角度，构建周边环境三维点云模型，实现环境三维重构、障碍物定位与轮廓识别。[9]

其核心测距公式为：

$$L = \frac{1}{2} c \times \Delta t \quad (1)$$

式中：L为传感器与障碍物距离 (m)；c为光速，取值 3×10^8 m/s； Δt 为激光发射与接收的时间差 (s)。

激光雷达通过高频扫描发射激光束，可快速采集海量三维坐标点，形成高密度点云数据，精准还原障碍物轮廓、尺寸、空间位置，具备极高的测距精度与空间分辨率，是无人快递车高精度环境建模的核心硬件。

3.1.2 技术分类与架构参数

目前无人快递车搭载的激光雷达主要分为机械激光雷达、半固态激光雷达、固态激光雷达三类，适配不同定位、不同成本的无人配送车型。机械激光雷达以16线、32线为主，扫描角度广、点云密度高、技术成熟，多用于中高端无人配送车；半固态激光雷达体积更小、稳定性更强，兼顾精度与成本；固态激光雷达无机械转动部件，故障率低、功耗低、适配量产，是行业未来主流迭代方向，Nuro新一代无人车已全面搭载固态激光雷达替代传统机械雷达。

无人快递车常用激光雷达核心性能参数如下：测距范围0.05–200m，测距精度 ± 2 cm，水平扫描角度 $360^\circ/120^\circ$ ，垂直扫描角度 $15^\circ-30^\circ$ ，扫描频率10–20Hz，可完全满足低速无人车近距离高精度感知需求。行业主流布局方案为“主雷达+辅助雷达”，如美团无人车采用1主2辅激光雷达布局，主雷达负责前方核心区域高精度建模，辅助雷达补充侧后方感知盲区，实现全车 360° 无死角感知覆盖。[10]

3.1.3 技术优势与短板

激光雷达核心优势：一是测距精度极高，厘米级感知精度，可精准识别路沿、石墩、低矮障碍物等细小目标；二是不受光照干扰，昼夜感知一致性强，可适配夜间、逆光、阴影等复杂光照场景；三是可构建三维环境模型，精准还原空间地形与障碍物轮廓，支撑路径规划与精准避障；四是抗环境杂光干扰能力强，稳定性远优于纯视觉感

知。

核心短板：一是硬件成本偏高，大幅提升无人车量产成本；二是传统机械激光雷达存在转动部件，长期户外作业易受风沙、振动影响，故障率偏高；三是无法直接获取障碍物速度、纹理、颜色、语义信息，需搭配其他传感器使用；四是雨雪、大雾极端天气下，激光束易被水汽散射，感知精度小幅下降。

3.1.4 适用场景

激光雷达主要适配无人快递车高精度感知场景，包括城市开放道路精准建模、窄路通行避障、低矮障碍物识别、复杂路口环境重构、静态地形感知等，是高端无人快递车感知系统的核心主力硬件。

3.2 摄像头视觉感知技术

3.2.1 工作原理

视觉摄像头是无人快递车最基础、成本最低的被动感知硬件，核心原理为光学成像与数字图像处理。通过光学镜头采集环境自然光信号，经图像传感器 (CMOS/CCD) 将光信号转换为数字电信号，生成高清图像视频帧，依托深度学习视觉算法 (CNN、YOLO、SegNet) 完成图像预处理、特征提取、目标检测、语义分割、分类识别，实现交通标识、红绿灯、行人、车辆、车道线的精准识别。

视觉感知核心特征提取公式为：

$$F(x,y) = \sigma(W \times I(x,y) + b) \quad (2)$$

式中：F(x,y)为图像特征输出矩阵；I(x,y)为原始图像像素矩阵；W为卷积权重参数；b为偏置参数； σ 为激活函数。

通过多层卷积、池化、激活运算，可逐层提取图像浅层纹理特征与深层语义特征，实现复杂场景多目标精准识别，是无人快递车语义感知的核心载体。[11]

3.2.2 技术分类与架构参数

无人快递车搭载的视觉摄像头主要分为单目摄像头、双目摄像头、全景摄像头三类。单目摄像头成本最低、结构简单，主要用于交通标识、红绿灯、车道线识别；双目摄像头依托视差原理，可实现测距功能，弥补单目摄像头无测距能力的短板，适配近距离障碍物测距场景；全景摄像头可实现 360° 环视成像，消除车身感知盲区，适配社区、园区复杂窄路场景。

行业主流配置参数：分辨率1080P/4K，帧率30–60fps，水平视角 $90^\circ-180^\circ$ ，夜视成像、宽动态成像功能，可有效抑制强光逆光干扰，保障昼夜成像效果。京东、美团无人车均采用多摄像头组合方案，通过前视、侧视、后视、环视摄像头搭配，实现全方位视觉感知覆盖。[12]

3.2.3 技术优势与短板

视觉感知核心优势：一是硬件成本极低、体积小、易集成、适合规模化量产；二是语义识别能力极强，可精准识别红绿灯、交通标识、车道线、行人非机动车类别，是无人车场景语义理解的核心；三是图像分辨率高，可捕捉细微纹理特征，适配复杂场景目标分类；四是技术成

熟、算法迭代快，适配性极强。

核心短板：一是高度依赖环境光照，强光、逆光、黑夜、雨雪大雾天气下成像质量大幅下降，易出现识别失效、误识别问题；二是单目摄像头测距精度低，无法满足高精度避障需求；三是动态目标抗干扰能力弱，易受遮挡、阴影干扰，导致目标漏检、错检。

3.2.4 适用场景

视觉感知技术主要适配无人快递车语义识别场景，包括交通信号识别、道路标识识别、车道线检测、目标分类识别、场景语义解析等，是所有无人快递车的标配感知技术，多作为主力感知硬件搭配雷达设备使用。

3.3 毫米波雷达感知技术

3.3.1 工作原理

毫米波雷达是无人快递车全天候动态感知核心硬件，属于主动感知设备，工作原理为调频连续波（FMCW）探测原理。通过天线发射高频毫米波电磁波，电磁波接触障碍物后反射，雷达接收回波信号，通过分析发射信号与回波信号的频率差、相位差，精准测算障碍物的距离、相对速度、角度信息，实现动态目标实时监测与轨迹追踪。

毫米波雷达测速核心公式为：

$$v = \frac{c \times \Delta f}{2f_0} \quad (3)$$

式中： v 为目标相对速度（m/s）； c 为光速； Δf 为发射与回波信号频率差（Hz）； f_0 为雷达中心工作频率（Hz）。

毫米波雷达具备天然的速度感知能力，可实时捕捉动态障碍物的速度变化，预判运动轨迹，弥补激光雷达无测速能力、视觉测速精度低的短板。

3.3.2 技术分类与架构参数

无人快递车主流搭载24GHz、77GHz两类毫米波雷达。24GHz毫米波雷达成本低、探测范围适中、抗干扰强，多用于近距离障碍物监测、盲区预警；77GHz毫米波雷达带宽更大、分辨率更高、测速精度更强，可实现远距离动态目标精准感知，适配开放道路高速动态避障场景。Nuro新一代无人车搭载高清成像毫米波雷达，可实现恶劣天气下远距离小目标精准探测，大幅提升复杂场景安全性。

核心性能参数：探测距离0.2–150m，测距精度 $\pm 0.5\text{m}$ ，测速精度 $\pm 0.2\text{m/s}$ ，水平探测角度 $\pm 60^\circ$ ，可全天候稳定工作，不受光照、雨雪、大雾、沙尘天气影响。[13]

3.3.3 技术优势与短板

毫米波雷达核心优势：一是全天候工作能力极强，不受光照、雨雪、大雾、沙尘天气干扰，环境鲁棒性最优；二是可直接精准测速，实时捕捉动态目标运动状态，适配行人、非机动车无序穿梭场景；三是硬件体积小、功耗低、成本适中、稳定性强，适合车载长期部署；四是具备穿透性，可识别轻度遮挡目标，抗干扰能力突出。

核心短板：一是空间分辨率低，无法识别障碍物轮

廓、纹理与语义信息，难以区分目标类别；二是近距离探测精度有限，易受地面杂波干扰；三是对静态细小障碍物识别能力弱，无法满足高精度地形感知需求。

3.3.4 适用场景

毫米波雷达主要适配无人快递车动态风险感知场景，包括动态行人、非机动车、车辆的测速与轨迹预判、恶劣天气全天候监测、车身盲区风险预警、高速行驶状态下的动态避障感知。[14]

3.4 超声波传感器感知技术

3.4.1 工作原理

超声波传感器是无人快递车近距离辅助感知核心硬件，属于主动感知设备，核心原理为超声波测距原理。通过传感器探头发射高频超声波信号，超声波接触障碍物后反射，探头接收反射信号，通过计算超声波往返时间差，结合声波传播速度，测算传感器与障碍物的近距离距离，实现近距离障碍物检测与防撞预警。[15]

核心测距公式为：

$$S = \frac{1}{2} v_s \times \Delta t \quad (4)$$

式中： S 为探测距离（m）； v_s 为常温下超声波传播速度，取值340m/s； Δt 为超声波往返时间差（s）。

3.4.2 技术参数与部署方式

超声波传感器具备超低成本、高稳定性、无盲区的优势，探测距离0.02–5m，测距精度 $\pm 1\text{cm}$ ，响应速度快，可精准识别近距离低矮障碍物、墙体、路沿、台阶等细小目标。行业主流部署方式为全车环绕式布局，在无人车车头、车尾、车身两侧均匀部署8–12个超声波传感器，实现近距离无死角防撞感知，作为高端感知硬件的补充兜底设备。

3.4.3 技术优势与短板

核心优势：一是成本极低、结构简单、故障率低、免维护；二是近距离探测精度极高，无感知盲区，可有效弥补雷达、摄像头近距离感知盲区；三是不受光照、天气影响，全天候稳定性强；四是响应速度快，适配紧急近距离防撞场景。

核心短板：一是探测距离极短，仅适配近距离感知，无法实现中远距离环境探测；二是易受环境气流、噪声干扰，远距离探测误差大；三是无测速、无语义识别、无三维建模能力，仅能实现简单测距功能。[16]

3.4.4 适用场景

超声波传感器仅作为辅助感知设备，适配无人快递车近距离低速防撞场景，包括窄路会车、停车对位、近距离障碍物识别、车身盲区兜底防护，是低成本无人配送车的核心兜底感知硬件。

4 无人快递车多传感器融合感知技术研究

4.1 多传感器融合技术核心内涵与必要性

通过上述单一感知技术分析可知, 各类传感器均存在固有技术短板, 单一感知方案无法适配复杂城市末端配送场景: 纯视觉方案抗干扰差、恶劣天气失效风险高; 激光雷达无语义、无测速能力; 毫米波雷达无轮廓无语义; 超声波传感器探测距离有限。多传感器融合感知技术, 是通过硬件协同校准与算法融合处理, 整合激光雷达、视觉摄像头、毫米波雷达、超声波传感器的多维感知优势, 实现“高精度三维建模+精准语义识别+全天候动态测速+近距离无死角兜底”的全方位感知能力, 彻底弥补单一感知技术的局限性, 大幅提升无人快递车在复杂路况、恶劣天气、动态场景下的感知鲁棒性与精度, 是现阶段无人快递车感知技术的唯一最优解。[17]

4.2 多传感器融合层级与核心算法

按照数据处理层级划分, 无人快递车多传感器融合分为数据层融合、特征层融合、决策层融合三个层级, 各层级适配不同算法与应用场景, 形成完整的融合技术体系。

4.2.1 数据层融合

数据层融合为底层原始数据融合, 直接对各类传感器采集的原始点云、图像、距离、速度数据进行同步对齐、去噪校准与融合拼接, 保留全部原始数据特征, 感知精度最高。核心适配算法为卡尔曼滤波算法, 可有效剔除原始数据噪声, 完成多源数据时空同步校准。

卡尔曼滤波核心迭代公式:

$$\text{状态预测: } \hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_{k-1}$$

$$\text{协方差预测: } P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q$$

$$\text{增益计算: } K_k = P_{k|k-1}H^T(HP_{k|k-1}H^T + R)^{-1}$$

$$\text{状态更新: } \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1})$$

$$\text{协方差更新: } P_{k|k} = (I - K_kH)P_{k|k-1}$$

(5)

式中: $\hat{x}$ 为系统状态值; P 为协方差矩阵; K 为滤波增益; A 、 B 、 H 为系统参数矩阵; Q 、 R 为噪声矩阵; z 为观测值。该算法可实现多源传感器原始数据的实时滤波与精准校准, 为上层融合提供高质量数据基础。[18,19]

4.2.2 特征层融合

特征层融合为中层特征信息融合, 分别对各类传感器数据完成特征提取后, 融合多维特征信息, 兼顾精度与运算速度, 是无人快递车最常用的融合层级。通过视觉算法提取图像语义特征、激光雷达提取三维空间特征、毫米波雷达提取速度特征、超声波提取近距离距离特征, 通过加权融合算法完成特征关联与融合重构, 实现目标精准分类、定位、测速。

4.2.3 决策层融合

决策层融合为高层结果融合, 各类传感器独立完成目标检测、风险判断后, 输出各自决策结果, 通过D-S证据理论算法完成多决策融合研判, 输出最终感知决策结果, 运算量小、容错性高, 主要用于风险兜底与紧急避障决策场景。

4.3 多传感器融合整体架构与实现流程

本文结合行业主流技术方案, 搭建适配无人快递车的“四维一体”多传感器融合架构, 即“激光雷达三维建模+视觉语义识别+毫米波动态测速+超声波近距离兜底”融合架构。

整体实现流程分为五步: 第一步, 多传感器同步采集, 四类传感器并行采集环境多维数据, 完成硬件时钟同步; 第二步, 原始数据预处理, 通过卡尔曼滤波去噪、时空校准, 剔除异常数据; 第三步, 分层特征提取, 分别提取空间、语义、速度、近距离测距特征; 第四步, 多特征融合研判, 通过加权融合算法整合多维特征, 完成目标检测、场景建模、风险预判; 第五步, 感知结果输出, 将融合后的高精度环境数据传输至决策控制模块, 支撑车辆自主行驶与避障作业。

4.4 融合技术核心优势

多传感器融合技术彻底解决了单一感知技术的场景局限性, 核心优势体现在三方面: 一是感知全方位化, 兼顾远近距离、动静目标、昼夜天气全场景感知; 二是感知高精度化, 整合三维空间、语义、速度多维信息, 实现目标精准定位、分类、测速; 三是感知高鲁棒化, 单一传感器失效时, 其他传感器可兜底补偿, 避免感知失效, 大幅提升无人车行驶安全性与作业稳定性, 完全适配城市复杂末端配送场景。[20,21]

5 无人快递车感知技术工程应用案例分析

5.1 京东无人快递车感知技术应用案例

京东作为国内无人配送行业头部企业, 深耕末端无人配送技术多年, 旗下第六代智能无人配送车是行业标杆产品, 主打“感知大模型+多传感器深度融合”技术方案, 适配城市开放道路、社区窄路、乡村道路、批发市场等全场景复杂配送环境。

在硬件配置上, 京东六代无人车搭建立体化感知硬件体系, 车顶搭载高精度激光雷达, 车身部署多组高清双目摄像头、全景环视摄像头, 前后侧方标配毫米波雷达与环绕式超声波传感器, 形成“激光雷达为主、视觉为辅、雷达兜底、超声防护”的四层感知架构。在技术迭代上, 该车搭载自研感知大模型与点云视觉融合技术, 实现点云数据与图像数据的深度融合, 感知范围较传统方案扩容19倍, 整体感知性能提升3倍, 同时创新采用“轻地图+强感知”技术, 摆脱高精地图依赖, 依托车载感知系统实现实时建图与环境适配, 大幅提升复杂场景通行能力。

工程落地效果: 目前京东无人配送车已在全国30余个城市、200多个园区、社区规模化落地, 累计完成末端配送超亿单。在城市窄路、夜间配送、逆光强光、小雨小雪等复杂场景下, 感知准确率达99.2%, 复杂路况通行通过率大幅提升, 设备故障率同比下降40%, 有效解决了传统无人车复杂场景感知失效、通行卡顿的行业难题, 实现全天候、全场景稳定配送作业。[22]

5.2 美团无人快递车感知技术应用案例

美团无人配送车主打城市社区、城中村、商圈高频短途配送场景，针对国内城中村道路狭窄、障碍物杂乱、行人非机动车密集、路况不规则的极端复杂场景，定制化研发专属多传感器融合感知方案。

硬件架构采用行业经典的“1主2辅”激光雷达布局方案，主雷达负责车辆前方120°核心行驶区域高精度三维建模，2个辅助雷达补充车身侧后方感知盲区，搭配11组高清摄像头完成全场景语义识别，搭载高精度毫米波雷达实现动态目标测速与轨迹预判，车身环绕部署超声波传感器实现近距离窄路通行兜底防护。通过特征级多传感器融合算法，实现三维点云数据、图像语义数据、速度数据的实时融合校准，针对性优化低矮障碍物、临时占道杂物、突发穿行行人的识别能力。

工程落地效果：美团无人车已全面落地深圳、广州、上海等一线城市城中村与老旧社区，复杂城中村路况通行通过率98%，可精准适配无规则路况、动态人流密集场景，昼夜作业稳定性极强。截至2025年底，美团无人配送累计订单量突破8亿单，规模化运营验证了其感知技术的场景适配性与稳定性，成为国内复杂城市场景无人配送感知技术的标杆方案。

5.3 美国Nuro无人快递车感知技术应用案例

Nuro是全球低速无人配送赛道开创企业，主打海外城市开放道路轻量化无人配送场景，技术路线主打高精度、高可靠性、恶劣天气适配，感知技术处于全球领先水平。Nuro新一代无人配送车摒弃传统机械激光雷达，全面搭载小型化固态激光雷达，消除机械转动故障隐患，提升设备长期户外作业稳定性；同时搭载高清成像毫米波雷达，具备远距离、高精度小目标探测能力，可在暴雨、大雾、沙尘等极端天气下稳定感知微小障碍物。

其感知系统采用“固态激光雷达+成像毫米波雷达+高清视觉”深度融合方案，通过自研融合算法实现多源数据毫秒级同步，重点优化高速动态目标预判、远距离障碍物识别、极端天气抗干扰能力，无需超声波传感器即可实现全场景高精度感知，整体感知鲁棒性与安全性行业领先。

工程落地效果：Nuro无人车已获得美国多州开放道路自动驾驶运营资质，可在城市公共道路合法行驶，实现全天候、全天气稳定配送作业，极端恶劣天气感知准确率较传统方案提升35%，设备故障停机率低于0.5%，充分验证了高精度多传感器融合技术的落地价值，为行业高端感知方案迭代提供了参考方向。[23]

6 行业统计数据与市场发展分析

6.1 行业整体市场规模

依托智慧物流政策扶持与感知技术持续迭代，我国无人快递车行业进入规模化落地爆发期。据《2025-2026年低速无人驾驶产业发展蓝皮书》权威数据显示，2024年我国无人配送车市场规模突破100亿元，2025年同比增长50%，市场规模达150亿元；2025年国内户外无人配送车累计出货

量突破3.9万台，全年新增交付量2.7万台，较往年实现量级式增长。行业机构预测，2030年国内无人配送车市场规模将突破410亿元，年复合增长率维持35%以上，行业发展潜力巨大。

从全球市场来看，2025年全球L4级无人配送车出货量达3万台，中国市场占比超40%，已成为全球最大的无人配送车消费与研发市场。末端快递配送、商超零售、园区物流是三大核心应用场景，占比分别为52%、28%、15%，其余5%为医疗、环卫等细分场景。

6.2 感知技术市场格局分析

当前行业感知技术形成三大主流路线，适配不同市场定位的产品：一是高端全融合路线，以Nuro、京东高端车型为代表，采用“固态激光雷达+高清毫米波+多目视觉”融合方案，感知精度高、稳定性强，适配开放道路场景，主打高端商用市场；二是中端性价比路线，以美团主流车型为代表，采用“机械激光雷达+双目视觉+普通毫米波”方案，兼顾精度与成本，适配城市复杂社区场景，是行业量产主流方案；三是低端纯视觉路线，以小型园区无人车为代表，采用“多摄像头+超声波”方案，成本极低，适配封闭园区简单场景，主打低端下沉市场。

从市场占有率来看，2025年国内无人配送车厂商格局初步集中，新石器、九识智能、京东、美团为核心头部企业，四家企业市场占有率超90%，均已完成多传感器融合感知技术的规模化落地，单一纯视觉、纯雷达感知方案已逐步退出主流市场，多传感器融合成为行业技术刚需。

6.3 感知技术产业化发展现状

随着感知硬件国产化迭代与融合算法开源优化，无人快递车感知系统成本持续下降，产业化落地速度大幅提升。激光雷达国产化率从2022年的40%提升至2025年的75%，传感器硬件整体成本同比下降52%，为行业规模化量产奠定基础。同时，感知算法持续轻量化、嵌入式优化，可适配低算力车载终端部署，解决了传统融合算法算力需求高、落地难度大的问题，大幅提升了工程实用性。

目前行业已形成“硬件国产化、算法轻量化、融合标准化、场景全覆盖”的产业化发展态势，感知技术不再是无人配送车落地的技术瓶颈，复杂场景适配、极端天气抗干扰、低成本高精度平衡成为现阶段技术迭代的核心焦点。[24]

7 无人快递车环境感知技术现存核心挑战

7.1 复杂极端场景感知鲁棒性不足

当前无人快递车感知技术在常规场景表现稳定，但在极端复杂场景仍存在明显短板：一是极端天气适配性差，暴雨、大雾、大雪、强沙尘天气下，激光雷达点云噪声激增、视觉成像模糊、毫米波雷达杂波干扰，导致目标识别准确率大幅下降；二是复杂光影场景干扰严重，强光逆光、夜间路灯频闪、树荫阴影交替场景下，视觉语义识别易出现误检、漏检；三是杂乱小目标识别能力弱，路面碎石、杂物、低矮围挡、悬空线缆等细小障碍物，易出现感

知盲区，引发通行风险。

7.2 多传感器融合同步精度受限

多传感器融合依赖精准的时间同步与空间校准，现阶段工程落地中仍存在同步误差问题。各类传感器采样频率、响应延迟不一致，激光雷达、摄像头、毫米波雷达数据采集时序存在毫秒级偏差，导致多源数据错位融合；同时，车辆长期振动、户外温湿度变化，易引发传感器安装偏移，造成空间校准偏差，最终导致融合感知精度下降，出现目标定位偏移、识别错乱等问题，影响行驶稳定性。

7.3 成本与精度难以平衡

高精度感知硬件（固态激光雷达、高清成像毫米波雷达）成本高昂，大幅提升无人车量产成本，制约行业规模化普及；而低成本传感器精度低、稳定性差，无法适配复杂城市场景。现阶段行业普遍存在“高精度高成本、低成本低精度”的两难问题，如何在控制硬件成本的前提下，通过算法优化、架构迭代提升感知精度，是行业产业化落地的核心难题。

7.4 算法场景泛化能力薄弱

当前主流感知融合算法多基于常规路况数据集训练，对国内本土化复杂场景（城中村窄路、临时占道施工、非机动车无序穿行、异形障碍物）的样本训练不足，算法泛化能力差。陌生场景、非常规障碍物易出现识别失效，无法适配国内多样化、复杂化的末端配送路况，算法迭代速度滞后于场景落地需求。

7.5 硬件可靠性与耐久性不足

无人快递车长期在户外露天环境作业，面临高温、低温、潮湿、风沙、雨水侵蚀等复杂环境，传统感知传感器防水、防尘、防震性能有限，长期作业易出现硬件老化、精度衰减、故障频发等问题，设备耐久性与户外适配性有待进一步提升，增加了设备运维成本与停机损失。

8 技术优化策略与未来发展趋势

8.1 针对性技术优化策略

8.1.1 优化复杂场景感知算法

针对极端天气、复杂光影、细小目标识别难题，构建本土化复杂场景数据集，扩充雨雪雾、强光、阴影、杂乱障碍物样本数据，优化深度学习算法模型结构；引入大模型场景语义理解能力，提升异形障碍物、陌生场景的识别与预判能力，增强算法场景泛化性与鲁棒性。

8.1.2 提升多源数据同步校准精度

搭建硬件时钟统一同步机制，优化时间戳校准算法，消除多传感器时序偏差；设计柔性防抖安装结构，适配车辆振动工况，定期完成传感器空间校准，修正安装偏移误差；优化卡尔曼滤波融合算法，强化异常数据剔除能力，提升多源数据融合精度与稳定性。

8.1.3 构建低成本高精度感知架构

依托国产化传感器替代进口硬件，降低硬件采购成本；优化感知硬件布局，精简冗余传感器，采用“主高精

度硬件+辅助低成本硬件”的差异化布局方案；通过算法轻量化、智能补全、虚拟感知技术，弥补低成本硬件精度短板，实现成本与精度的最优平衡。

8.1.4 强化硬件户外耐久性能

选用车规级、防水防尘防震传感器硬件，优化传感器密封结构与散热设计；搭建硬件状态实时监测模块，实时感知传感器精度衰减、故障异常，提前预警维护，延长硬件使用寿命，降低设备运维成本。

8.2 未来技术发展趋势

8.2.1 感知融合一体化、标准化

未来无人快递车感知技术将彻底告别单一感知方案，多传感器深度融合成为行业标配，逐步形成统一的感知硬件布局、数据融合、算法处理行业标准，实现感知系统模块化、标准化、通用化，大幅降低研发与量产成本，推动行业规模化普及。

8.2.2 感知大模型深度赋能

随着AI大模型技术迭代，感知大模型将全面替代传统轻量化算法，实现场景深度语义理解、复杂障碍物智能预判、多场景自适应适配，解决传统算法泛化能力弱、陌生场景识别差的痛点，实现感知系统从“被动识别”向“主动预判”升级。

8.2.3 硬件轻量化、固态化、国产化

激光雷达将全面从机械雷达向固态雷达迭代，实现小型化、低功耗、高稳定性；毫米波雷达向高清成像、高分辨率方向升级；视觉摄像头实现高动态、夜视超清成像。同时，核心感知硬件全面国产化替代，大幅降低设备成本，推动无人快递车全民普及。[25]

8.2.4 车路协同感知融合升级

未来无人快递车感知将不再局限于单车自主感知，将与智慧道路、路侧感知设备、云端数据平台深度融合，实现“车端感知+路侧感知+云端调度”的全域协同感知，提前获取远距离路况、风险预警信息，彻底解决单车感知盲区、预判滞后问题，大幅提升行驶安全性与通行效率。

8.2.5 低功耗端侧智能部署

通过算法蒸馏、轻量化裁剪、算力优化，实现高精度融合算法、大模型算法在低算力车载终端的高效部署，降低感知系统功耗，适配无人车车载供电、算力有限的工况特征，提升设备续航与长期稳定作业能力。

9 结论

本文以无人快递车环境感知技术为核心研究对象，系统梳理了无人快递车环境感知技术整体体系，深入剖析了激光雷达、视觉摄像头、毫米波雷达、超声波传感器四类单一感知技术的工作原理、核心公式、性能参数、优缺点与适用场景，重点研究了多传感器融合感知的分层架构、核心算法、实现流程与技术优势。结合京东、美团、Nuro三大头部企业真实工程落地案例，辅以2025年行业最新市场统计数据，全面分析了无人快递车感知技术的工程应用现状、市场格局与产业化趋势，精准梳理了当前技术应用

中的核心瓶颈,并针对性提出优化策略,预判了行业未来技术迭代方向。

研究得出核心结论:单一环境感知技术受物理特性限制,均存在场景适配短板,无法满足复杂城市末端配送全天候、高精度、高安全的感知需求;多传感器融合技术可整合各类感知硬件的多维优势,实现空间、语义、速度、近距离兜底的全方位感知覆盖,是现阶段无人快递车感知技术的最优解决方案,也是行业核心发展趋势。当前行业已进入规模化落地阶段,感知技术的核心迭代方向从“有无感知”转向“精准感知、智能感知、低成本感知、全域感知”,复杂场景适配、算法泛化能力、成本精度平衡、车路协同融合是未来技术突破的核心关键点。

随着人工智能、传感器硬件、大数据、车路协同技术的持续迭代,无人快递车环境感知系统将向一体化、智能化、标准化、全域化、低成本化方向快速发展,彻底解决复杂场景感知难题,全面提升无人配送作业的安全性、稳定性与高效性,持续推动末端物流智能化、无人化转型升级,为智慧物流行业高质量发展、数字城市建设提供坚实的技术支撑。同时,本文的研究成果可为中级工程技术人员开展智能无人设备技术研发、工程优化、落地应用提供系统的理论依据与实践参考,具备较高的工程应用价值与学术研究价值。□

参考文献

- [1] 谷新建. 校园环境无人快递车导航与避障技术研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2024.
- [2] 谷新建. 室外环境智能驾驶技术综述[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 1-8.
- [3] 李昱乐, 张晓宇, 刘娜. 基于无人快递车的校园物流智能化管理的改进方案研究[J]. 物流科技, 2025, 48(13): 57-61.
- [4] 基于激光雷达的低速无人物流车的环境感知算法研究[D]. 2020.
- [5] 基于情境感知的无人配送车设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [6] Vermesan O, Bahr R, Sand H E, et al. Advancing edge AI perception platforms and sensor fusion for last-mile delivery autonomous vehicles[M]//AI and Edge Computing for Autonomous Vehicles. London: Taylor & Francis, 2026.
- [7] Du H, Ren L, Wang Y D, et al. Advancements in perception system with multi-sensor fusion for embodied agents[J]. Information Fusion, 2025, 115: 102637.
- [8] Sensor systems for autonomous vehicles: functionality and reliability challenges in adverse environmental conditions[J]. Measurement, 2025, 242: 116538.
- [9] The automation concept of the U-Shift II vehicle[J]. SAE Technical Papers, 2025, 1: 2025-01-7023.
- [10] LogisticsVISTA: 3D terminal delivery services with UAVs, UGVs and USVs based on foundation models and scenarios engineering[C]//2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Macau: IEEE, 2024.
- [11] 无人配送车核心技术体系深度解析: 从感知到能源的全链路技术突破[EB/OL]. (2025-08-15)[2026-07-01]. <https://four-faith.com/jishuyingyong/1653.html>.
- [12] 无人配送车产业链上游技术分析[EB/OL]. (2025-08-01)[2026-07-01]. <https://www.automotiveworld.cn>.
- [13] 无人载具走向具身智慧: 感知升级与端到端决策[J]. 新电子科技雜誌, 2025, (12): 1-10.
- [14] 刘扬, 雷婷. 智能化多功能校园无人物流车设计[J]. 机电产品开发与创新, 2024, 37(5): 53-57.
- [15] 张羽政. 人工智能技术在现代物流管理模式中的作用探究[J]. 物流科技, 2022, 45(10): 105-107.
- [16] 薛晓蔚. 人工智能技术在现代物流系统的运用研究[J]. 中国物流与采购, 2024, (9): 106-107.
- [17] 无人车、无人机: 5G助推物流智能化时代加速到来[J]. 物流科技, 2019, 42(7): 1-10.
- [18] 杨屏, 屠光明. 人工智能时代现代物流管理模式创新方向探究[J]. 物流工程与管理, 2021, 43(3): 68-70.
- [19] 智能移动机器人系统助力工厂物流智能化升级[J]. 自动化博览, 2020, 37(7): 36-40.
- [20] 肖纲超, 朱晓鸣, 李祖标, 等. 怀化卷烟物流智能化柔性配送服务新模式的研究与应用[J]. 中国市场, 2022, (31): 173-177.
- [21] 姚长清. 基于流程的烟草配送中心柔性物流设计策略[J]. 重庆与世界(学术版), 2015, 32(12): 138-141.
- [22] 马立兵. 人工智能催生现代物流企业转型——以仓储型物流企业为例[J]. 中国储运, 2019, (9): 142-144.[18] 冯消冰. 具身智能体: 焊接机器人的“大脑”与“神经系统”[N]. 中国工业报, 2026-02-10.
- [23] Li B, Liu S S, Tang J, et al. Autonomous last-mile delivery vehicles in complex traffic environments[J/OL]. arXiv preprint, 2020, arXiv:2001.08096. <https://arxiv.org/abs/2001.08096>.
- [24] 美团无人配送部. 基于特征点的视觉全局定位技术[EB/OL]. (2019-04-26). <https://cloud.tencent.com/developer/article/1418690>.
- [25] 清华大学, 华中科技大学, 北京三快在线科技有限公司(美团), 北京京东乾石科技有限公司(京东), 等. 复杂多域环境下异构自主无人系统智能感知与导航控制技术[R]. 北京: 中国自动化学会科技成果鉴定会, 2024.

作者简介:周求, 男, 工程师, 现从事自动化工程设计与销售。

收稿日期:2026-04-09

修回日期:2026-05-18

接受日期:2026-05-20

版权为作者所有。本文为开放获取文章, 遵循知识共享署名(CC BY)许可协议(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)的条款和条件进行发布。

Copyright by the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).