基于超构透镜阵列的广角智能仿生运动探测器

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41459.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

导读

近期，东南大学青年首席教授陈绩团队在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Bioinspired planar intelligent nanophotonic sensor for wide-angle accurate motion perception and prediction的研究论文。

该研究受自然界中昆虫复眼启发，利用超构透镜阵列实现了一种超广角（135°）、超高精度的智能运动目标探测器。可以准确获取运动物体的速度和方向信息，有效解决复杂环境条件下，慢速、小尺寸等物体难以被探测的问题，并智能预测物体后续的运动轨迹。该器件兼具高集成度、优异运动探测性能与智能化等优势，可为自动驾驶、态势感知及军事侦察等应用提供有力的技术支持。

自然界中，昆虫凭借独特的复眼结构，拥有超宽视场、高时间分辨率与出色的运动感知能力。复眼由大量独立感光小眼构成，可同时实现大视角成像与快速动态响应，帮助昆虫高效完成导航、避障、捕食等行为。这种将宽视场光学采集与神经信息处理相结合的生物机制，为先进视觉系统研发提供了重要仿生思路，推动研究者长期致力于仿复眼成像技术的探索。

传统仿生复眼多采用曲面透镜阵列拓展视场，虽能实现较宽视角，但曲面排布带来加工难度高、装配复杂、器件体积大等问题，难以满足微型化、轻量化的应用需求。近年来，超构透镜技术快速发展，凭借亚波长纳米结构实现精准波前调控，具备超薄、轻质、高效率、平面化等优势，为构建紧凑型仿生复眼系统开辟了新路径。

然而，现有超构透镜阵列成像器件仍存在明显不足：多数难以复现昆虫复眼的超宽视场特性，且系统多面向静态场景设计，对微小、慢速或与背景融合的运动目标检测能力有限。同时，传统机器视觉算法在复杂环境下的精度与鲁棒性欠佳，无法满足自动驾驶、态势感知、智能监控等领域对宽视角、高精度、智能化运动感知的实际需求。

本研究受昆虫复眼天然宽视场与高灵敏运动感知机制启发，设计并实现了一种基于超构透镜阵列的广角智能仿生运动探测器，用于大视场、高精度运动感知与轨迹预测。超构透镜作为一种由亚波长纳米结构构成的平面光学元件，可在单层结构内完成波前调控，具备超薄、紧凑、轻量化与易集成等突出优势。本研究突破传统仿生复眼必须采用曲面结构的限制，在平面基底上复现了昆虫复眼的超大视场能力，为微型化、集成化运动感知系统提供了全新的硬件实现路径。所提出的PINS 传感系统结构如图1所示。系统核心为三片式宽视角超构透镜阵列，单片视场45°，整体水平视场超过135°，可一次性覆盖大范围场景。系统集成550

nm带通滤光片、杂散光抑制掩模、CMOS 图像传感器与ESP32微控制器，形成一体化成像探测模块。为保证最佳成像效果，研究团队采用可精密调节的机械结构，精准控制超构透镜阵列与图像传感器之间的距离，使不同距离目标均能实现清晰成像，大幅提升了系统在实际环境中的适用性与稳定性。

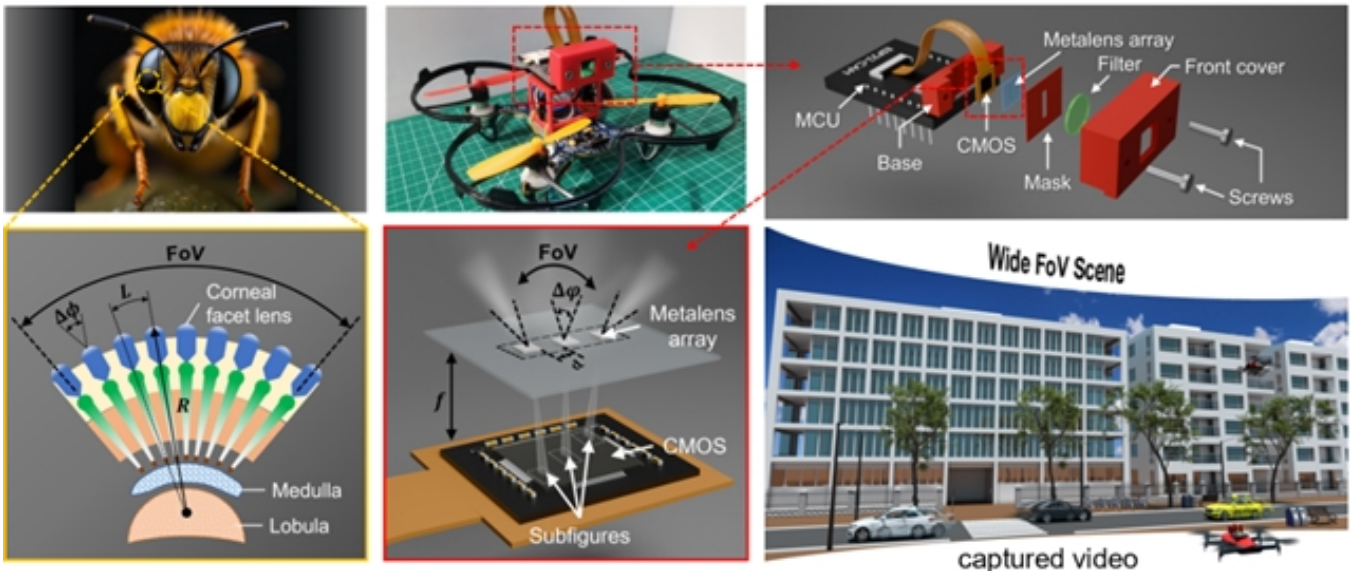


图1：基于超构透镜阵列的广角智能仿生运动探测器与昆虫复眼的对比

图源：东南大学

为解决超构透镜成像缺少专用数据集的难题，研究团队建立了基于点扩散函数（PSF）的卷积成像模型，可快速生成大规模、高保真、贴合真实成像的训练样本。该模型通过卷积、噪声添加与亮度衰减模拟，精准还原超构透镜成像的畸变、模糊与响应特性，避免了传统实拍数据集标注成本高、成像畸变难矫正、光流真值不准确等问题。利用该方法生成的数据集，可显著提升深度神经网络的训练效率与光流估计精度，为后续高性能运动检测奠定了数据基础。在此基础上，研究团队提出元运动感知网络（MMS）能够从连续宽视场图像中精准提取光流信息，完整表征运动目标的速度、方向与姿态。对比实验表明，该方法在微小目标、慢速运动及复杂背景下的检测精度与鲁棒性显著优于传统 YOLO 等机器视觉算法，可稳定识别传统方法难以检测的目标，如图2所示。同时，系统整体结构紧凑、重量轻，可直接搭载于微型无人机等移动平台。

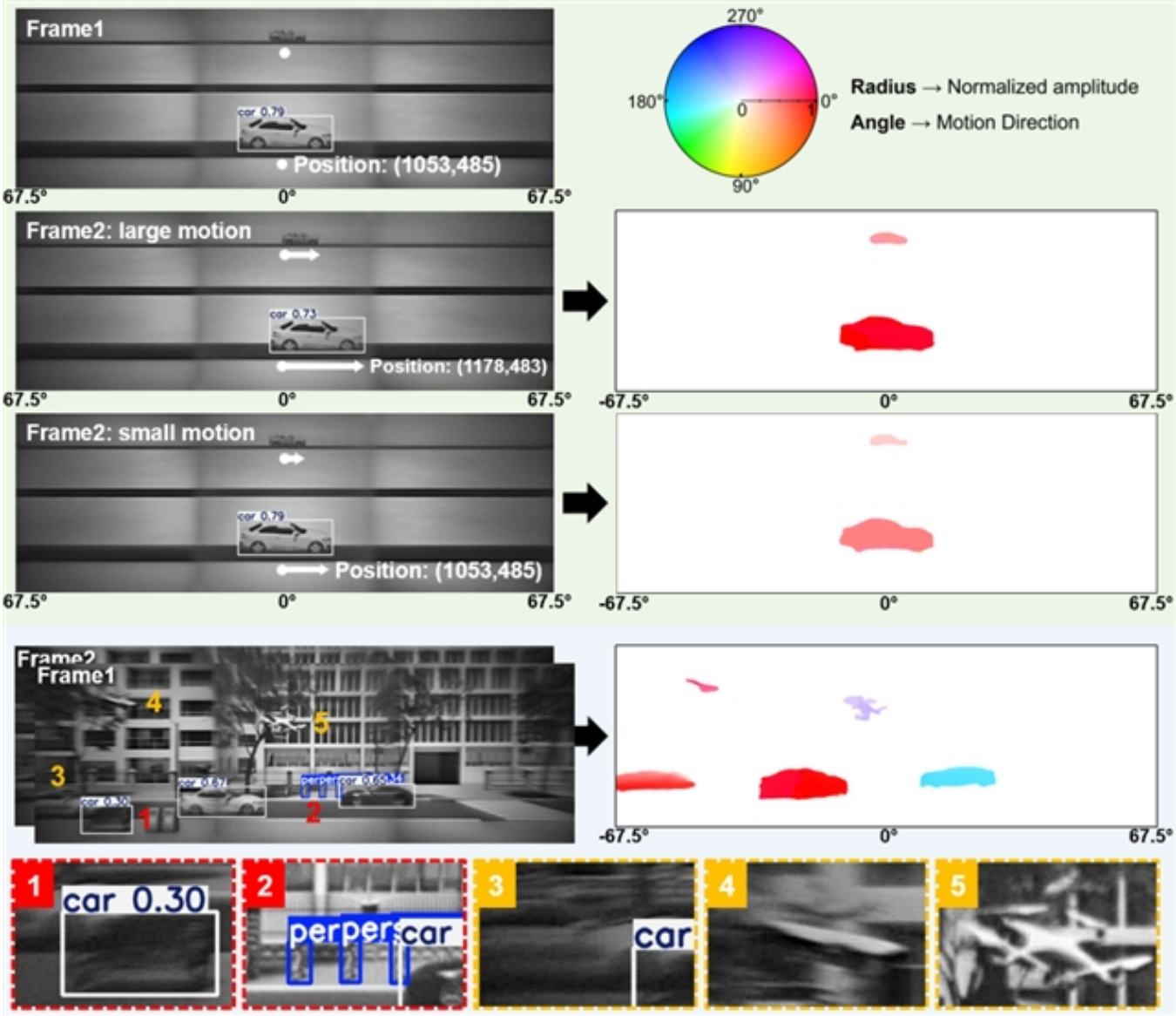


图2：探测器件对慢速、小尺寸、复杂背景等运动目标的探测结果

图源：东南大学

为实现对动态目标的智能预判，研究团队进一步搭建了轻量化运动轨迹预测（MTP）框架，可直接由光流信息完成对目标未来位置与运动趋势的精准推演。该框架先通过感兴趣区域提取与质心定位确定目标当前状态，再利用卡尔曼滤波抑制噪声，并结合加权多项式拟合对速度信息进行建模，最终实现对未来多帧位置的外推预测，如图3所示。研究展示了正弦、螺旋、直线等多种典型运动轨迹的预测，在短至1帧、长达30帧的预测范围内均保持较高精度。针对多目标交叉、重叠等复杂场景，框架结合角度域K?means聚类实现目标分离与唯一ID分配，能够稳定完成多目标连续跟踪与轨迹并行预测。整套模块计算量小、响应速度快，平均单目标预测时间仅3.21ms，可满足实时运动感知与自主决策系统的工程应用需求。

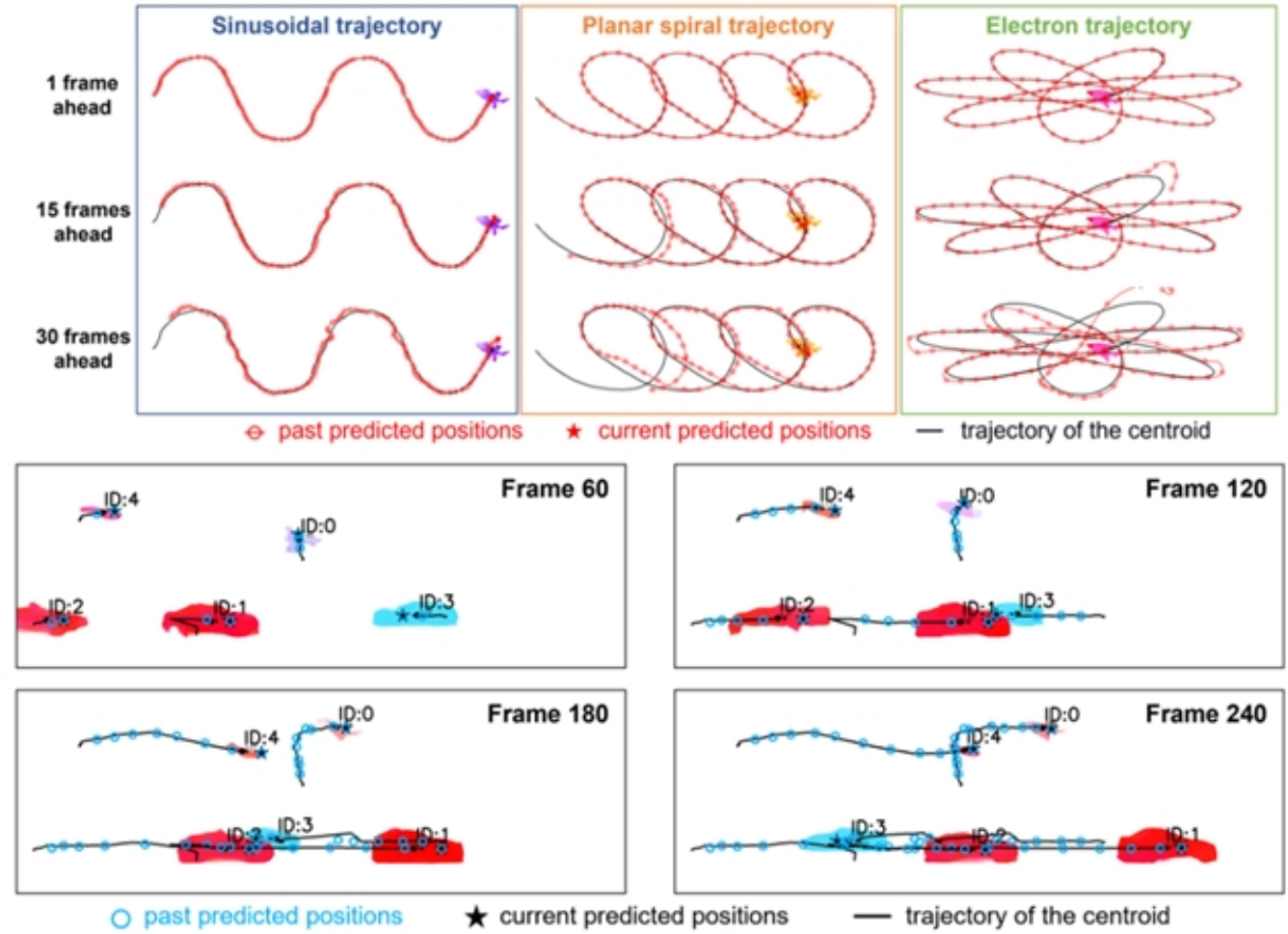


图3：研究分别对单目标和多目标运动轨迹的预测结果

图源：东南大学

总结与展望

本研究成功构建了一套受昆虫复眼启发、基于超构透镜阵列的平面智能纳米光子传感系统，实现135°超宽视场下的高精度运动检测与轨迹预测，在小目标、慢运动及复杂背景下展现出显著优于传统机器视觉的鲁棒性。通过PSF卷积成像模型生成专用训练数据集，结合MMS神经网络与MTP预测框架，系统可高效提取光流、精准反演运动状态并可靠预测未来轨迹，同时保持器件高度紧凑、轻量化，可直接集成于各类移动平台。未来可进一步提升成像帧率与传感器动态范围，优化网络实时性，并拓展双目深度感知与全景视场能力，增强目标遮挡、复杂环境干扰等场景下的跟踪稳定性，推动该技术在智能机器人视觉、车载环境感知、穿戴式动态监测、工业现场安全预警、低空安防与小型无人系统自主决策等领域实现更广泛的落地应用。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.064

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。

作者：陈绩等 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发