

# 无人系统自主协同三维信息获取

杨必胜、陈驰、孙上哲（汇报人）

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室  
2023年6月28日

# 01 研究背景及意义：重大需求



2023年习近平总书记  
视察广汽研究院

“中国将机器人纳入国家科技创新的优先重点领域，推动机器人科技研发和产业化进程，使机器人科技及其产品更好为推动发展、造福人民服务。”

——习近平总书记致世界机器人大会的贺信

习近平总书记了解企业突破关键核心技术和推动制造业高端化、智能化、绿色化等进展情况。“**关键核心技术**要立足自主研发，也欢迎国际合作。要加强教育和人才培养，夯实科技自立自强根基。”

——习近平总书记视察广汽研究院

习近平总书记指出，随着信息化、工业化不断融合，以**机器人科技**为代表的**智能产业蓬勃**兴起，成为现时代科技创新的一个重要标志。

——《“十四五”机器人产业发展规划》新闻发布会

智能驾驶



公共服务



物流运输



无人作战



深空探测



基础设施巡检



无人系统成为推动国家经济发展、深地深空探测、军事等应用场景的重要力量

# 01 研究背景及意义：重大需求

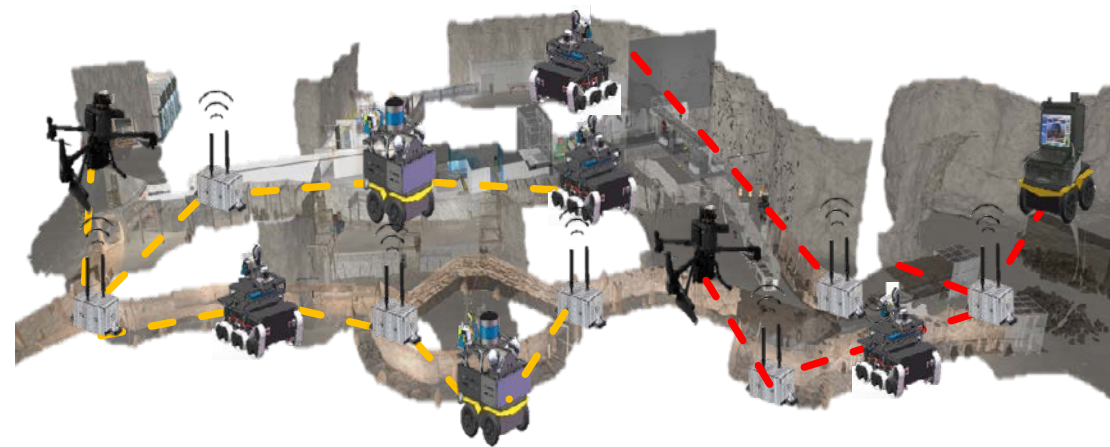
无人系统是第一种集采集与感知、定位与制图、决策与控制等功能于一体的智能系统。水-陆-空-地下-深空多类复杂空间环境存在多要素耦合、多维度约束的特性，单一无人系统难以有效克服复杂环境多样性挑战。

单一无人系统平台



视野单一，感知范围受限，感知能力不足

异构协同多无人系统平台



多视角探测，全面感知、跨域多平台协同

异构协同无人系统是应对复杂空间多样性挑战的必由之路

# 01 研究背景及意义：重大需求

多栖异构协同无人系统是由多栖平台、任务载荷、控制系统及天-空-地-水信息网络等组成的一个综合系统



多栖异构协同无人系统



多栖异构协同无人集群具有全面感知、全域响应、精准认知、自主协同、高效机动的优势可以实现多个平台之间功能的互补、效能的倍增

# 02 学术前沿与难题

跨域空间环境复杂多变、尺度不一、目标众多，难以实时探测



DARPA SubT地下挑战赛



NASA JPL 火星洞穴探测



中国国际月球科研站



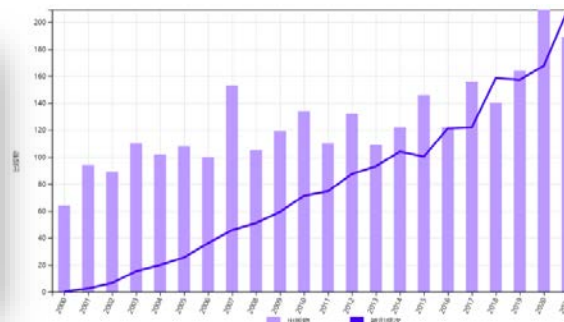
仿细胞集群机器人  
(Nature, 2019)



祝融号着陆  
(中国航天, 2021)



MAV集群  
(Science Robotics, 2022)



无人集群探测研究数量攀升



- 无人化探测是跨域空间探索的必由途径，也是国际研究前沿
- GNSS拒止空间高效探测与制图是亟需攻克的前沿科学问题和工程技术难题
- 面临全面感知、精准认知与自主协同等技术瓶颈

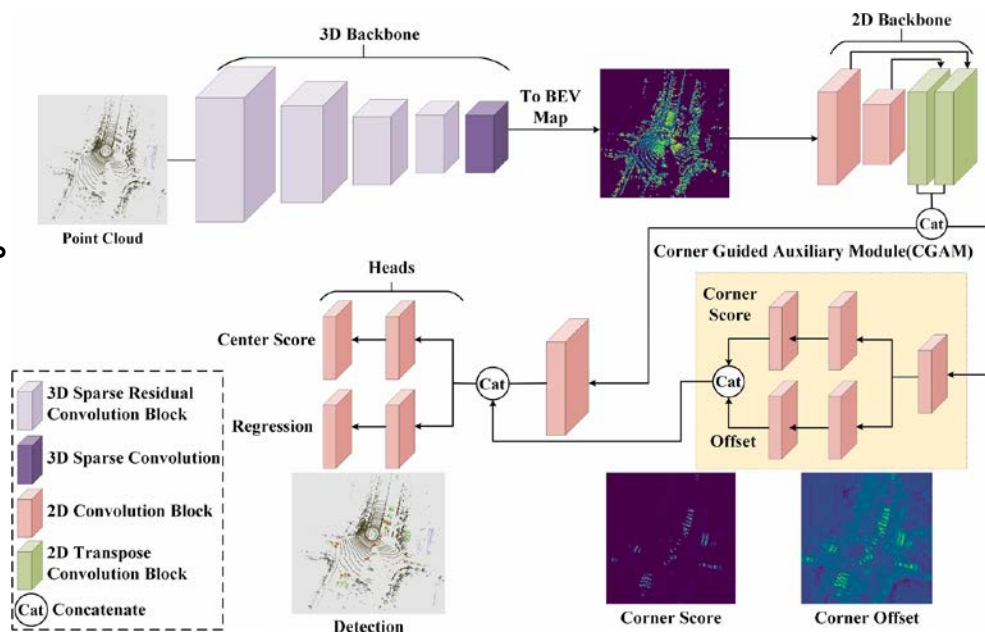
# 03 全面感知与精准认知: CG-SSD 角点监督目标感知

## 面临挑战

由于**物体之间的遮挡**和**LiDAR传感器扫描角度变化**，LiDAR无法获取完整的**目标表面点云**。现有点云3D目标检测方法都是通过**强制分类和回归中心点**来得到检测框，而**中心点周围是不存在点云数据**，这限制了现有方法的检测精度。

## 技术路线

针对不完整的表面点云，CG-SSD方法提出了一种**角点检测辅助的3D目标检测方法**。在进行目标检测前，首先检测出**目标的角点位置**，再将角点的信息**附加给网络学习的特征**并送入**检测头**，得到最终的检测结果。



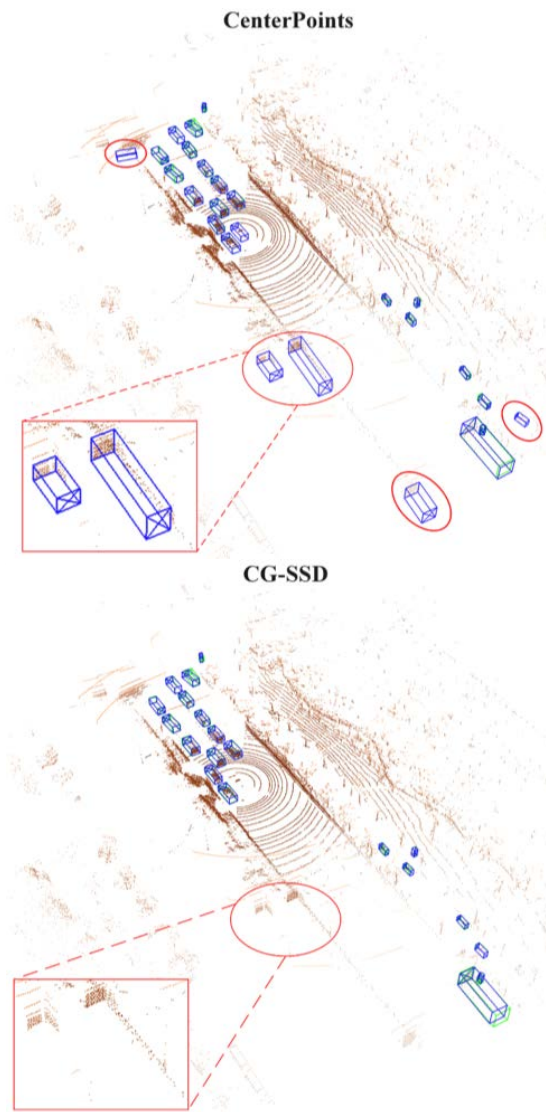
## 主要创新

提出一种自适应的角点分类方法；提出一种角点检测辅助模块，并且可以作为插件用于其他网络中，即插即用。

## 技术指标

- 取得**ONCE数据集上单阶段单帧点云检测精度排名第一**
- 角点辅助模型可以**作为插件的形式**助力其他模型提升精度，**精度最高可提升14.23%**。

## 无人驾驶目标检测

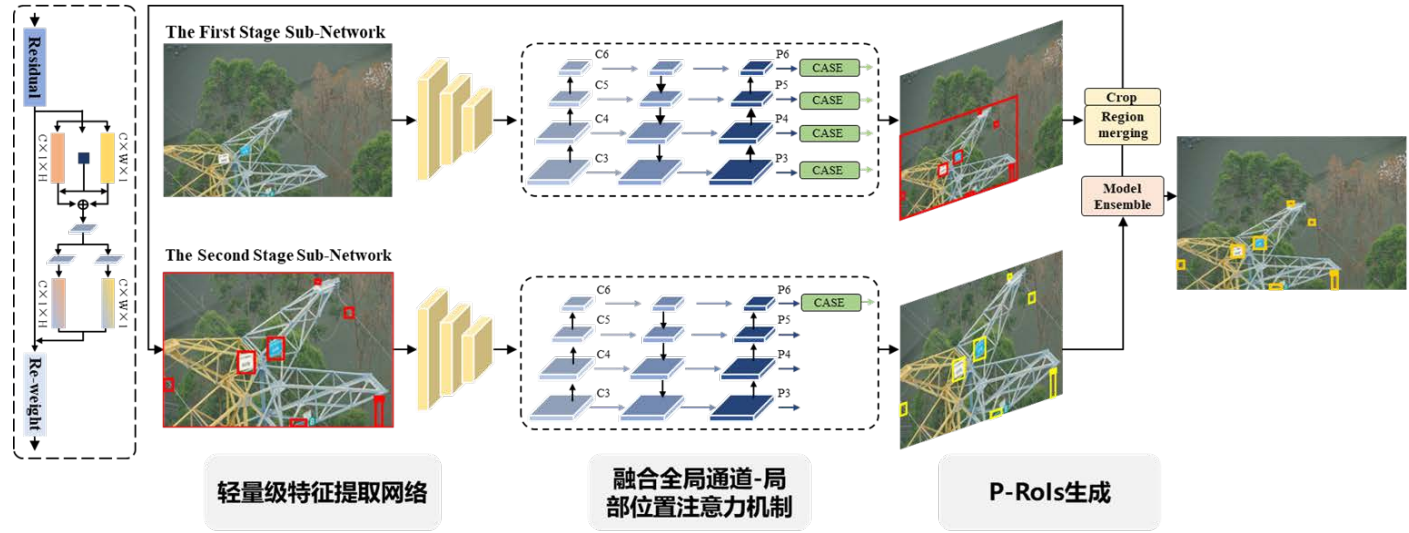


# 03 全面感知与精准认知：CC-YOLO 空间语义引导的微小目标检测

## 面临挑战

- 场景小目标众多，遮挡严重，MaskRCNN，ViT等方法检测效果不佳
- 视角多变、尺度差异明显、训练标注受限

## 技术路线



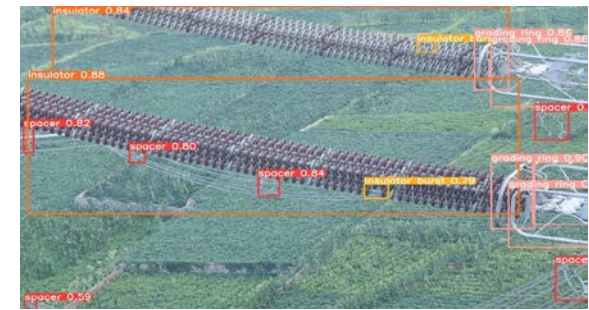
## 主要创新

- 提出了一种融合坐标和通道信息的**注意力机制**，用于**改善尺度、方向改变造成的定位精度降低**。
- 构建了**级联检测网络(CC-YOLO)**，在**第一级检测感兴趣区域(PC-RoIs)**，在**第二级网络中检测小尺度对象部件**。

## 技术指标

电力场景中，与SOTA(TPH-YOLO)相比，小尺度部件提升**6.1%AP**，绝缘子爆片类别显著提升**8.9%AP**

### 小目标检测



# 03 融合定位与无偏制图: SGSR-Net: 结构语义引导的MBL点云超分辨率

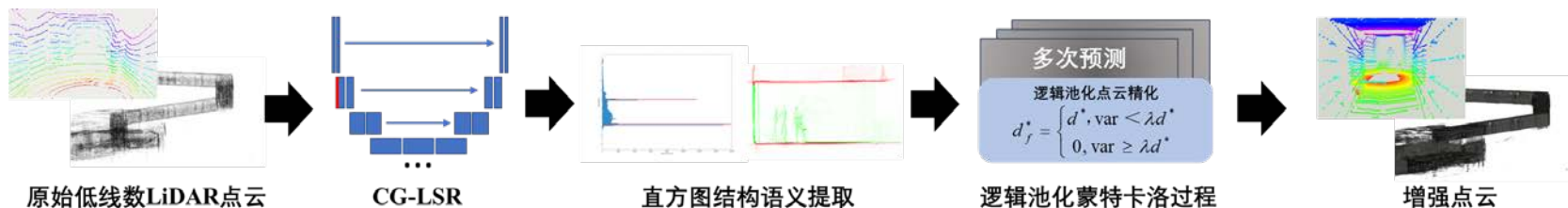


## 面临挑战

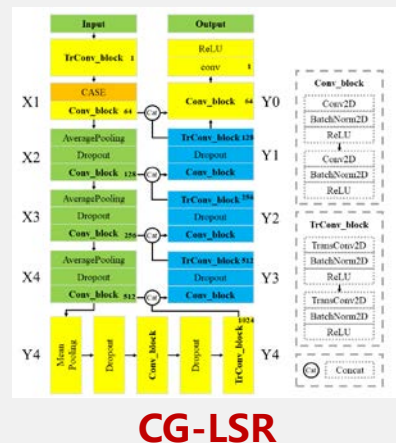
- 现有低线数激光雷达点云超分辨率深度学习方法效果有待提升
- 现有的从低线数激光雷达点云超分辨率研究没有考虑场景的几何语义, 从而导致下游子任务(如SLAM)的超分辨率点优化不足。



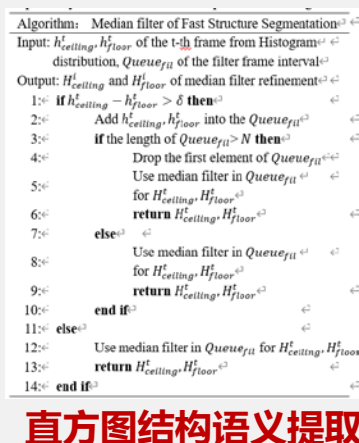
## 技术路线



## 主要创新



### 点云超分辨率网络



$$\lambda_1 = \frac{(\lambda_{max} - \lambda_{min})}{1 + e^{-b \times [h - (H_{floor} + \epsilon_h)]}} + \epsilon_\lambda$$

$$\lambda_2 = \frac{(\lambda_{max} - \lambda_{min})}{1 + e^{-b \times [-h + (H_{ceiling} - \epsilon_h)]}} + \epsilon_\lambda$$

$$\lambda(h) = \max(\lambda_1, \lambda_2)$$

### 逻辑池化蒙特卡洛点云精化过程



## 技术指标

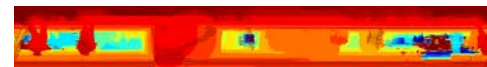
- CG-LSR神经网络将超分辨率点的MAE降低了12.4%, 降至0.177m。
- SGSR-Net的室内SLAM (LeGO-LOAM) 结果的绝对位姿误差(APE)的均值和RMSE分别降低了27%和30%, 降至0.849m和0.902m

以上基于SOTA方法: Simulation-based Lidar Super-resolution for Ground Vehicles 相比

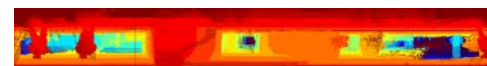
## 点云超分辨率



(a) 16 线雷达深度图



(b) 超分辨率 128 线深度图



(c) 真值 128 线深度图

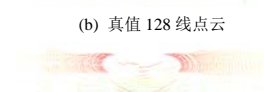


(d) 残差图

## CG-LSR点云超分辨率结果



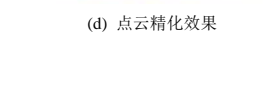
(a) 16 线点云



(b) 真值 128 线点云



(c) 超分辨率 128 线点云



(d) 点云精化效果

## SGSR-Net点云精化结果



# 03 融合定位与无偏制图：3D-CSTM时空连续的三维建图系统



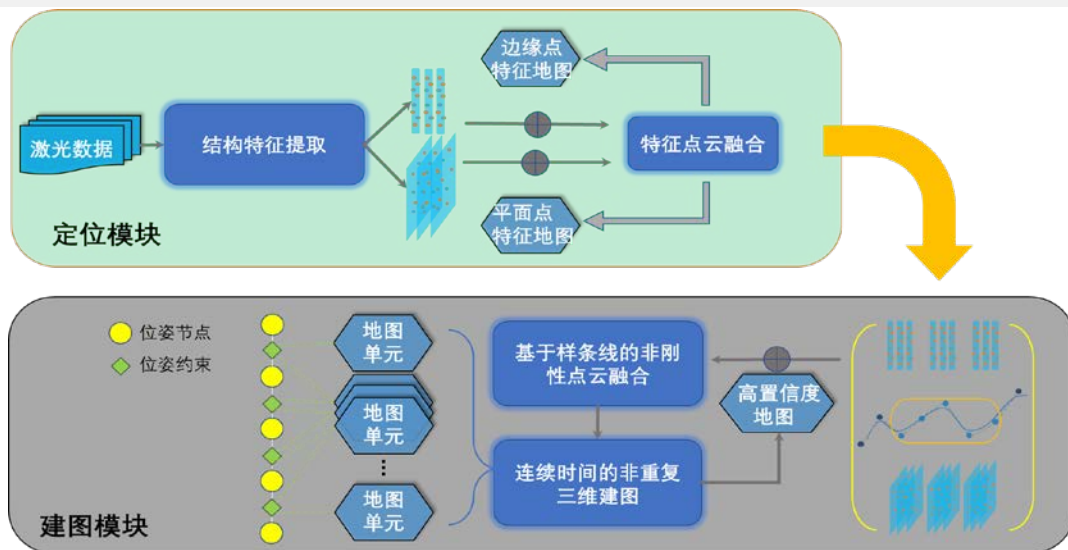
## 面临挑战

- 低成本、低线数的MBL传感器视角小、点密度低，带来**退化场景L-SLAM困难**
- UGV等小型运动平台受地形影响大，位姿动态高，**离散SLAM方法难以适用**

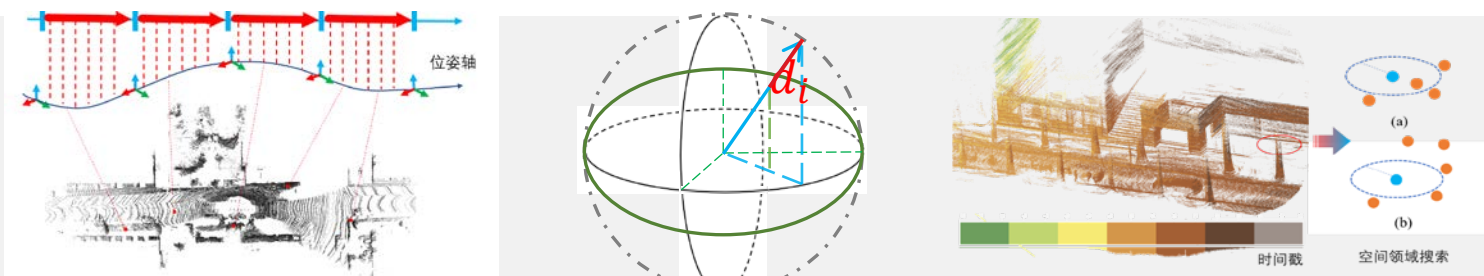


## 技术路线

**3D-CSTM** 提出一种连续时空的SLAM方法，构建统计误差向量优化约束椭圆关联共轭特征筛选模型，基于样条线拟合的连续时间-空间非刚性点云建图。



## 主要创新



样条线运动建模

可观性特征筛选模型

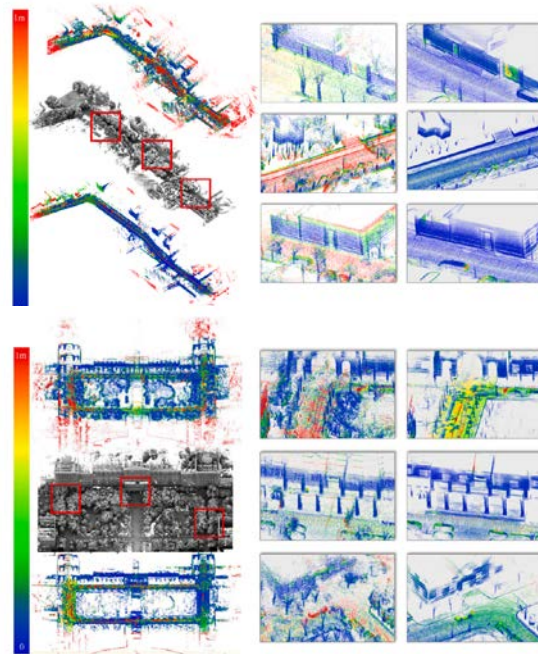
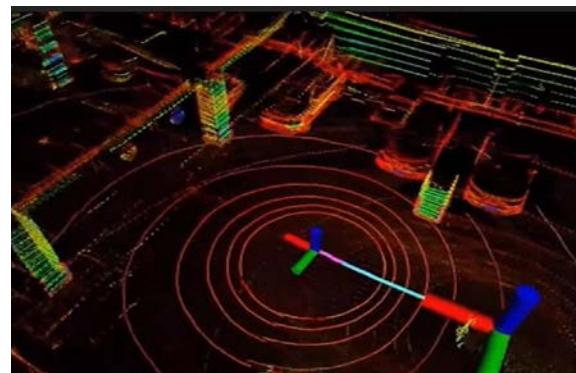
连续时空低冗余点云



## 技术指标

- 与SOTA方法Lego\_LOAM相比，3D-CSTM的**APE减小27.5%**
- 3D-CSTM构建的点云**地图误差减小了20%**，且冗余低

## 时空连续建图



# 03 跨域异构无人系统自主协同：动态自组网与任务自适应规划

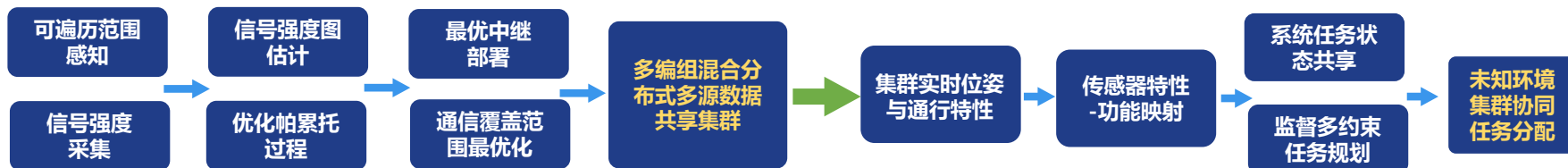


## 面临挑战

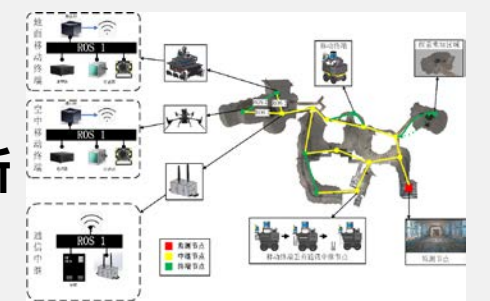
- 单智能体面对跨域未知空间，**算力、续航、通行模式有限。**
- 当前无人系统智能体间**协同能力弱。**
- 无人系统难以实现**高效任务协同优化配置。**



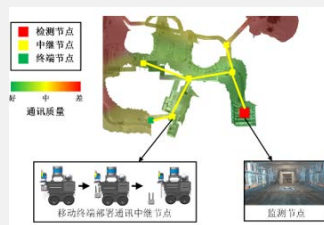
## 技术路线



## 主要创新

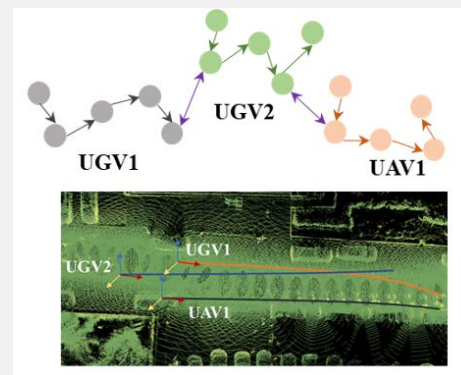


跨域异构无人系统动态自组网



最优中继投放

自主投放中继信标



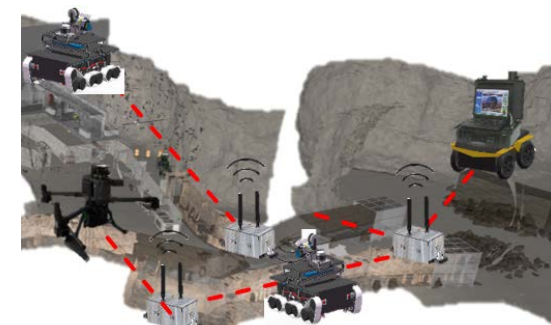
任务协同



## 技术指标

- 在算力、续航与通行能力有限条件下，在实地与仿真未知空间跨域异构无人系统自主协同探索环境覆盖度平均**优于85%**、协同探索效率达到**200m<sup>3</sup>/s**。

## 跨域异构无人系统自主协同作业



# 03 跨域异构无人系统自主协同：空地无人平台联合定位与建图系统

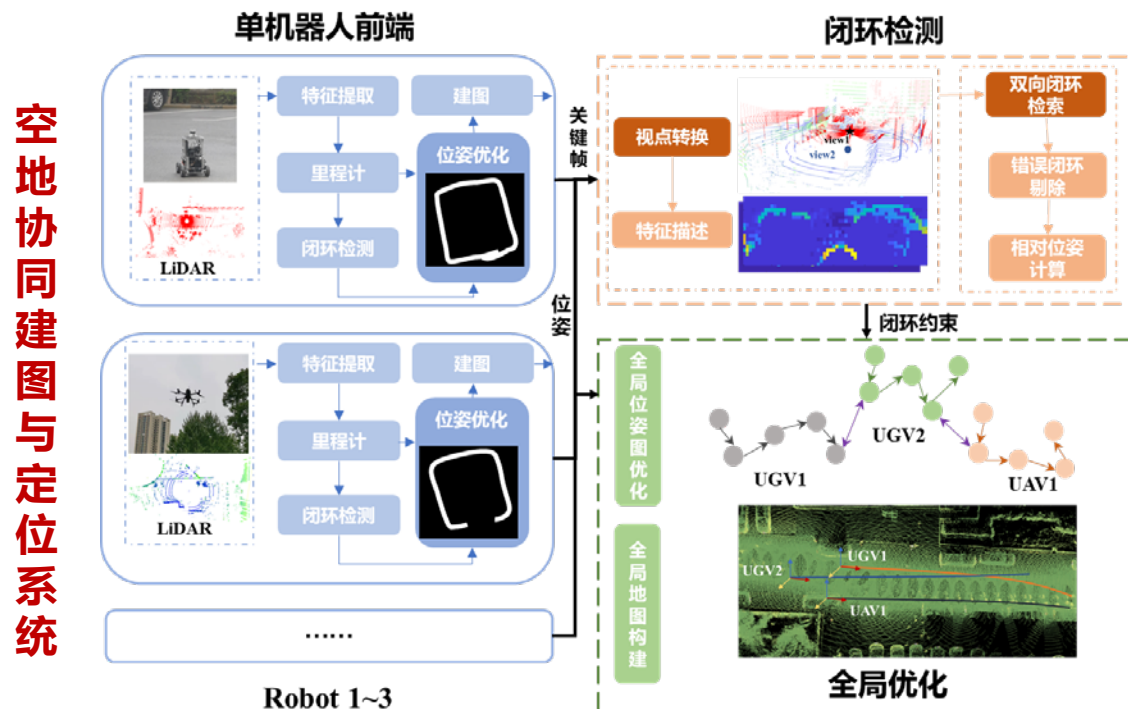


## 面临挑战

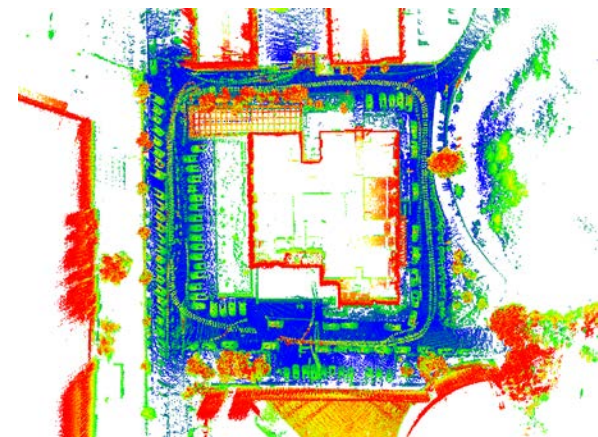
- 现有多无人平台激光协同SLAM多为UGV间协同，**缺乏UAV-UGV协同激光SLAM系统**
- 现有的闭环检测点云描述子**缺乏视点转换能力**，不适用于空地平台间的闭环检测



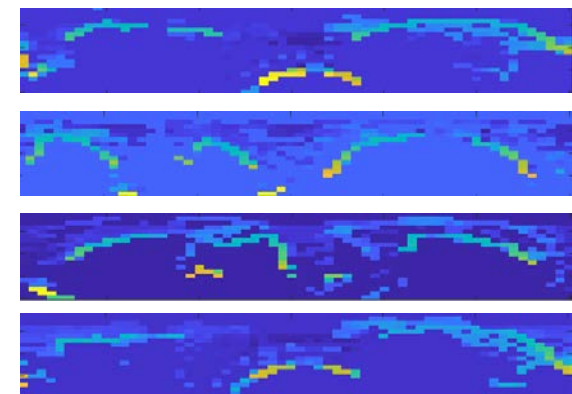
## 技术路线



## 空地联合建图



## 全局地图构建结果



## 点云描述子结果



## 主要创新

构建**空地**无人平台的联合定位与建图系统  
提出**具备视点转换能力**的点云描述子用于闭环检测

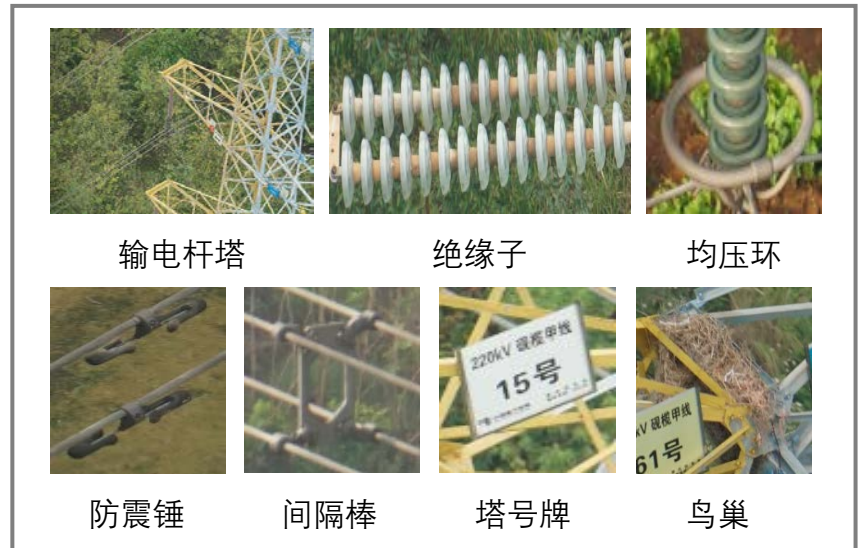
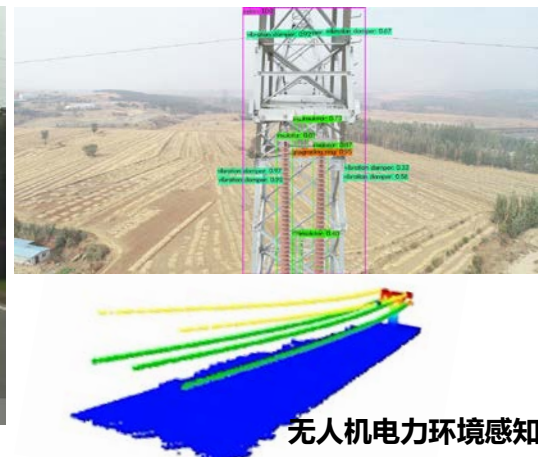
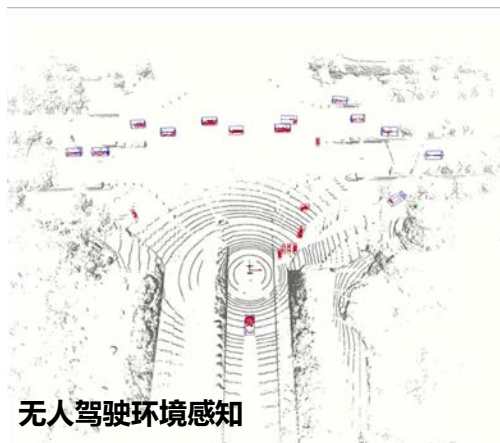


## 技术指标

- 闭环检测**正确率**可达**97%**
- 联合轨迹绝对位姿误差(APE)的均值和RMSE分别为**0.4m**和**0.6m**
- 联合地图与真值地图点到点dist的均值小于**0.08m**

# 04 阶段成果：无人系统自主感知与认知

提出了CG-SSD检测器，攻克了融合检测技术瓶颈，在ONCE无人驾驶公开数据集目标检测排名第一，并成功应用于Robotaxi无人驾驶公开道路示范运营，为无人系统的自主避障与规划奠定基础，相关论文获得了中国电机工程学会，国际、美国摄影测量学会最佳论文奖



数据集	类别	图像尺寸	图像数量	背景复杂度	实例/张	实例
CPLID	1	1152×864	848	简单	1.9	1569
STN PLAD <sup>[1]</sup>	5	5472×3078	133	较复杂	18.1	2409
Tomaszewski <sup>[2]</sup>	1	5616×3744	2630	简单	1	2630
DCSI	7	6000×4000	1346	复杂多变	8.95	12050



国际摄影测量与遥感 ISPRS  
国际移动测量学会 MMT 最佳论文  
奖 (2013, 陈驰, 排名1)

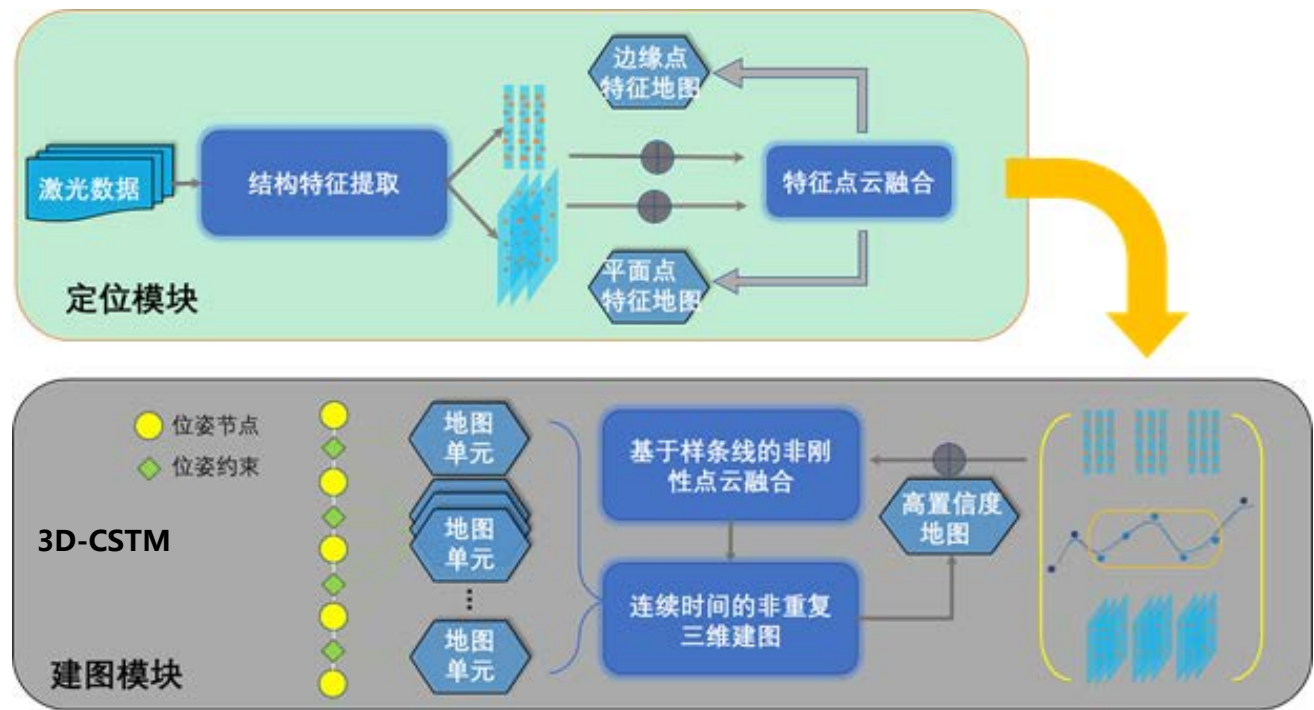
美国摄影测量与遥感学会 (ASPRS)  
最佳论文奖 (2022)

中国电机工程学会  
最佳论文奖(2020, 陈驰, 排名1)

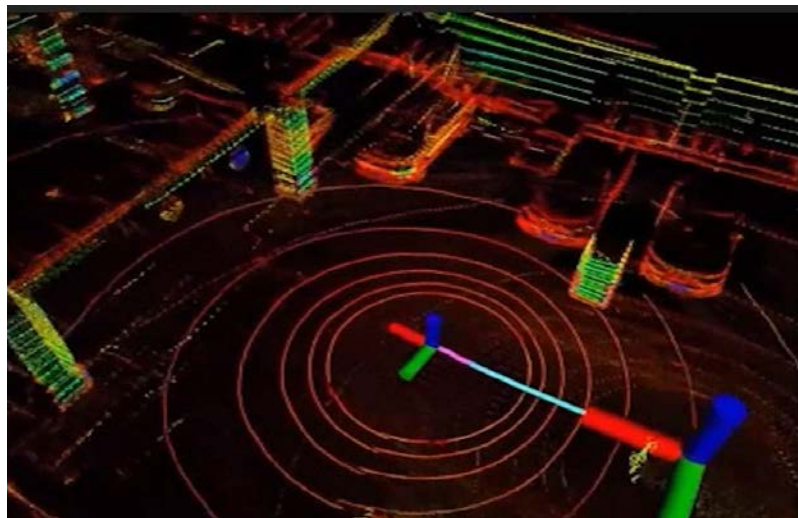
DCSI -UAV电力巡检部件与故障检测  
标准数据集 (全球首个大规模电力巡检Benchmark)

# 04 阶段成果：无人系统高精度制图

研制了3D-CSTM时空连续的三维建图系统，实现了无GNSS等多种复杂环境三维地图构建，核心技术在武汉、广州、上海等多个大型自动驾驶示范区进行了验证，建设了东风、广汽智能网联示范区道路高精地图，全长累计超过1000公里



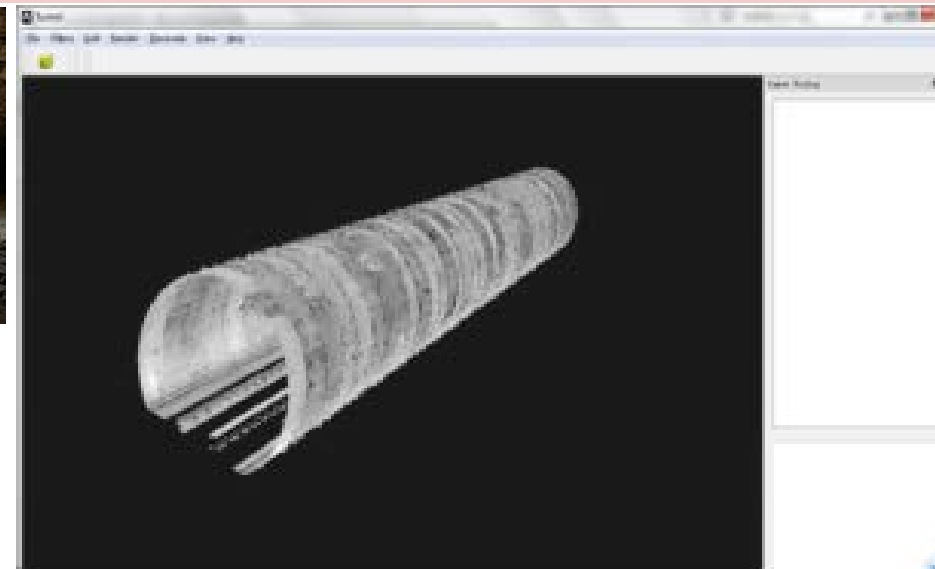
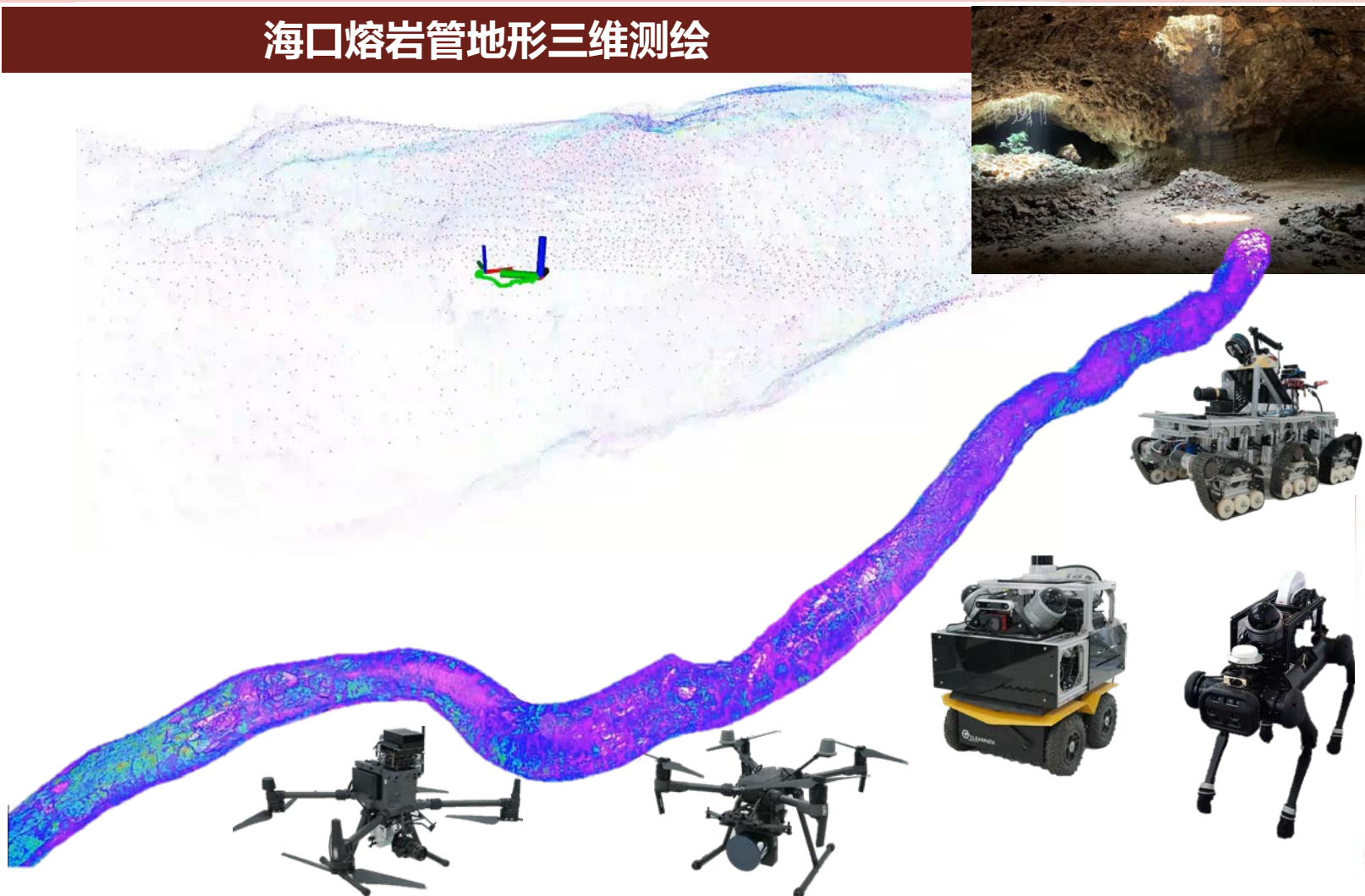
3D-CSTM时空连续的三维建图系统



# 04 阶段成果：地下空间自主探测装备研制

研制了“珞珈探索者”无人地下空间探测系统, 相关核心技术服务地下空间测绘、激光隧道检测, 获测绘科技进步一等奖

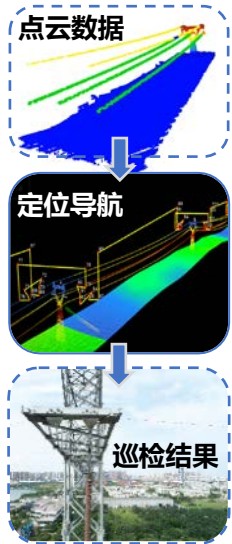
### 海口熔岩管地形三维测绘



测绘科技进步  
一等奖  
(排名1)

# 04 阶段成果：异构无人系统自主协同装备研制

研制了无人机、无人车、机器人等多类无人平台移动感知定位和制图系统，服务电力巡检、无人驾驶等多类应用，获得测绘科技进步特等奖



电网无人巡检装备研制

东风领航自动驾驶装备研制

测绘科技进步特等奖 (2019, 排名1)

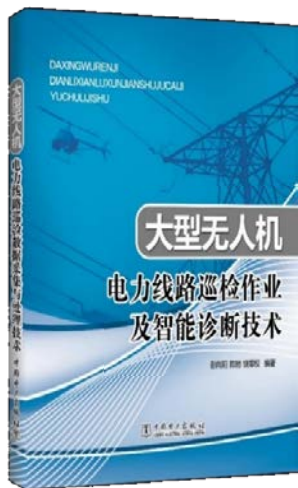
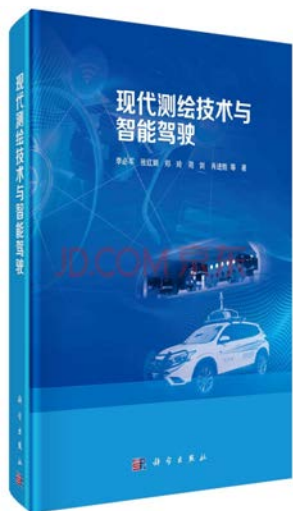
央视报道  
空地协同  
无人系统  
成果



# 04 阶段成果—学术专著与代表性论文

在**激光点云智能处理、地图模型、地图存储、众包测绘与增量更新**等方面都有开创性的研究成果，**广义点云理论方法入选ISPRS重要前沿方向**，出版专著3部，出版相关论文100余篇，国家发明专利40余项，多篇论文入选F5000，ESI高被引论文，获国际-美国摄影测量学会、中国电机工程学会最佳论文奖。

## 学术论著



## 高水平论文

Acta Geodesica et Cartographica Sinica, Vol. 41, No. 10, October 2017  
英文摘要: 程建刚, 黄富强, 李德仁. 三维激光扫描点云数据智能处理研究进展、挑战与趋势. 测绘学报, 2017, 46(10): 1309-1316. DOI: 10.1194/j.issn.1041-8089.2017.10.1309  
YANG Bisheng, LIANG Fuxun, HUANG Ronggang. Progress, Challenges and Perspectives of 3D LiDAR Point Cloud Processing. Acta Geodesica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1309-1316. DOI: 10.1194/j.issn.1041-8089.2017.10.1309

三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势  
程建刚, 黄富强, 李德仁  
武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

Progress, Challenges and Perspectives of 3D LiDAR Point Cloud Processing  
YANG Bisheng, LIANG Fuxun, HUANG Ronggang  
State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: 3D LiDAR can perform an intensive sampling of the earth surface in a direct way, and yield the 3D point cloud that contains numerous and scattered points with the coordinates (X, Y, Z) and attributes (e.g., intensity). As the vital 3D geospatial data for description of the world in the digital era, 3D point cloud plays an important role not only in earth science researches but also in national requirements (e.g., global change analysis, global mapping, and smart city). Inspired by sensor technologies and national requirements, 3D LiDAR has got great progresses in hardware, data processing and applications, and



ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing  
Hierarchical extraction of urban objects from mobile laser scanning data  
Bisheng Yang<sup>1</sup>, Zhen Dong<sup>1</sup>, Gang Zhan, Wenxia Dai  
State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Point clouds collected in urban scenes contain a huge number of points (e.g., 300,000), numerous objects with significant size variability, complex and irregular structures, and variable point densities, causing great challenges for the automated extraction of urban objects in the field of photogrammetry, computer vision, and robotics. This paper addresses these challenges by proposing an advanced method to extract urban objects efficiently and effectively. The proposed method generates multi-scale representations from 3D point clouds using the point attributes (e.g., colors, intensities) and spatial distances between points, and then separates the representations under their individual points by combining graph-based segmentation with multiple cues (e.g., point cloud structure, colors of the segments). The proposed method delivers a set of rules for merging separate size meaningful units according to types of urban objects and breaks the semantic knowledge of urban objects for the classification of objects. Finally, the proposed method extracts and classifies urban objects in hierarchical order based on the saliency of the segments. Experiments show that the proposed method is efficient and robust for extracting buildings, streetlights, trees, streetlight poles, traffic signs, cars, and excavators from mobile laser scanning (MLS) point clouds with an overall accuracy of 92.35.



## 发明专利与软件著作权





# 04 阶段成果—制定标准与获得奖励

在**激光点云智能处理、地图模型、地图存储、众包测绘与增量更新**等方面都有开创性的研究成果，制定国家/行业标准**5**项，获得国家级科技奖励**2**项，国际奖励**1**项。

## 标准

- GB/T 35646-2017 《导航电子地图增量更新基本要求》
- GB/T 35645-2017 《导航电子地图框架数据交换格式》
- GB/T 35640-2017 《公交导航数据模型与交换格式》
- GB/T 40085-2021 《导航电子地图分区网络模型》
- 行业标准 《道路高精导航电子地图数据规范》

## 奖励

- 道路路面动态检测关键技术及装备
- 国防交通地理信息系统关键技术及应用
- Carl Pulfrich国际奖



# 04 阶段成果—承担国家项目

## 团队承担重大项目情况

项目类型	负责人	获批时间	项目名	项目经费
国家重点研发计划	杨必胜	2022	复杂空间场景数字孪生关键技术与应用	1800万
国家重点研发计划	李必军	2021	高精度自动驾驶动态地图与北斗卫星融合定位技术	4000万
国家重点研发计划	杨必胜	2016	国产空地全息三维遥感系统研制及产业化	2000万
国家杰出青年科学基金	杨必胜	2018	广义点云多细节层次三维建模理论与方法	350万
国家自然科学基金重点项目	陈驰	2022	地下空间无人集群协同自主探索与3D感知定位制图	252万
国家自然科学基金重点项目	杨必胜	2021	城市立体形态结构化建模理论方法	291万
国家自然科学基金重点项目	杨必胜	2016	广义影像点云构建与多细节层次建模	302万

申报编号: SQ2022YFB3900005

### 国家重点研发计划 项目申报书

项目名称: 复杂空间场景数字孪生关键技术与应用  
所属专项: 地球观测与导航  
指南方向(榜单任务): 6.1 复杂空间场景数字孪生关键技术与应用(共性关键技术类)  
创新分类: 技术开发  
项目管理专业机构: 科学技术部高技术研究中心  
推荐单位: 教育部  
申报单位: 武汉大学 (公章)  
项目负责人: 杨必胜

项目编号: 2021YFB0501100 密 级: 公开

### 国家重点研发计划 项目任务书

项目名称: 高精度自动驾驶动态地图与北斗卫星融合定位技术  
所属专项: 新能源汽车  
指南方向(榜单任务): 4.2 高精度自动驾驶动态地图与北斗卫星融合定位技术(共性关键技术)  
创新分类: 技术开发  
项目管理专业机构: 科学技术部高技术研究中心  
推荐单位: 湖北省科学技术厅  
项目牵头承担单位: 武汉大学 (公章)  
项目负责人: 李必军  
执行期限: 2021年12月至2024年11月

### 科学技术部高技术研究中心

关于下达国家重点研发计划“国产空地全息三维遥感系统研制及产业化”项目综合绩效评价结论的通知

立得空间信息技术股份有限公司:  
你单位牵头承担的“国产空地全息三维遥感系统研制及产业化”项目执行期已满。按照《关于进一步优化国家重点研发计划项目和资金管理的通知》(国科发资〔2019〕45号)、《国务院办公厅关于改革完善中央财政科研经费管理的若干意见》(国办发〔2021〕32号)、《国家重点研发计划资金管理办法》(财教〔2021〕178号)以及相关配套管理制度等要求,你单位组织对该项目下设各课题任务完成情况进行了绩效评价;我们组织对该项目进行了综合绩效评价,现将综合绩效评价结论下达你单位。

#### 一、项目综合绩效评价结论

项目综合绩效评价结论为通过,评分为90.17分(A),绩效等级合格。

课题编号	课题名称	课题资金评审得分	课题资金(万元)	应上交结余(万元)
2014YFF0103501	国产空地全息三维遥感系统系统设计与整机开发	77.57	66.98	0



### 国家自然科学基金 申请书

(2022版)

资助类别: 重点项目  
亚类说明: 地球与行星科学研究的新技术和新方法  
项目名称: 城市立体形态结构化建模理论方法  
申请人: 杨必胜 电话: 13986099632  
依托单位: 武汉大学  
通讯地址: 湖北省武汉市武昌区八一路199号  
邮政编码: 430072 单位电话: 027-6872100  
电子邮箱: bsb@whu.edu.cn  
填写日期: 2021年03月06日

国家自然科学基金委员会



### 国家自然科学基金 申请书

(2022版)

资助类别: 联合基金项目  
亚类说明: 重点支持项目  
附注说明: 区域创新发展联合基金  
电子信息领域  
项目名称: 地下空间无人集群协同自主探索与3D感知定位制图  
申请人: 陈驰 电话: 18571670588  
依托单位: 武汉大学  
通讯地址: 湖北省武汉市 珞珈路129号 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室 早期实验楼A栋503室  
邮政编码: 430079 单位电话: 027-6872100  
电子邮箱: chichen@whu.edu.cn  
填写日期: 2022年03月07日

国家自然科学基金委员会

中华人民共和国科学技术部制  
2022年08月28日

中华人民共和国科学技术部制  
2021年12月16日

# 04 阶段成果—示范验证

东风汽车、广汽、中汽研、光谷智联在智能网联汽车领域承担了多项国家重点研发计划。拥有多个国家/省部级研发平台，拥有**智能网联示范区、自动驾驶研发平台、自动驾驶巴士、自动驾驶实车测试系统、V2X硬件在环与仿真测试平台**等基础设施和软硬件工具。

## 测试示范环境：先导区/示范区/试验场



## 科研基础设施： 自动驾驶与V2X 仿真/HIL/EMC



## 自动驾驶研发平台：

- 自动驾驶乘用车研发平台
- 自动驾驶巴士研发平台
- 自动驾驶观光车研发平台
- 与一汽奔腾、中兴智能汽车、中铁十九局联合研发的新一代自动驾驶乘用车、巴士、矿车研发平台



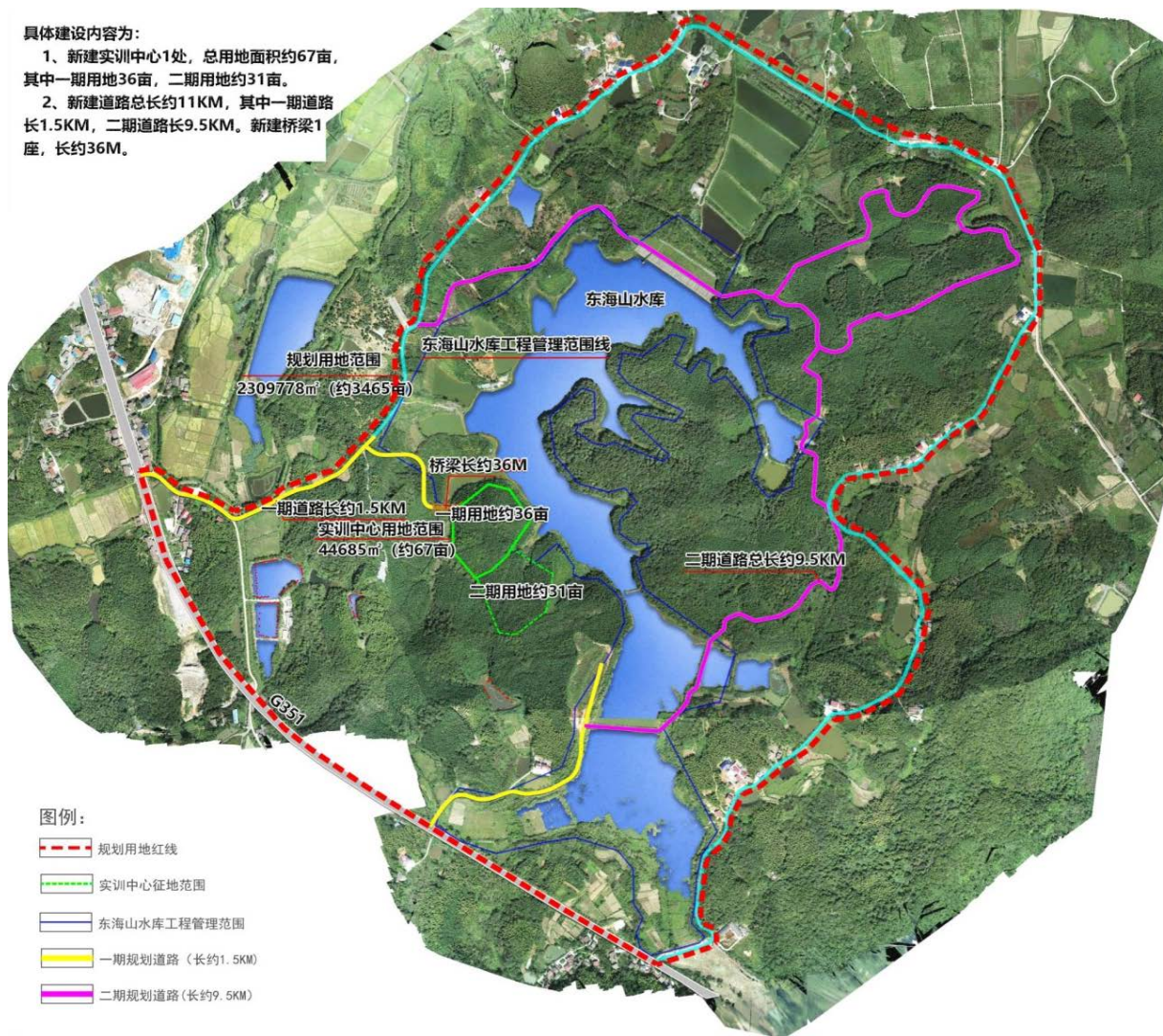
# 04 阶段成果—武汉大学赤壁无人基地

## 智能无人系统测试基地道路及用地总规划总平面图

具体建设内容为:

1、新建实训中心1处,总用地面积约67亩,其中一期用地36亩,二期用地约31亩。

2、新建道路总长约11KM,其中一期道路长1.5KM,二期道路长9.5KM。新建桥梁1座,长约36M。



基地规划

### 多无人系统智能运控



### 智能驾驶



### 智能无人集群



### 北斗+5G

# 04 阶段成果—武汉大学赤壁无人基地

## 赤壁智能无人系统基地



## 武汉大学智能无人系统基地



## 途智系列无人车 + 珞珈探索者集群机器人



打造特色鲜明、国内领先的**智能无人系统创新研究基地**

# 05 总结与展望

坚持需求牵引  
面向国家需求

构建创新体系  
集中优势力量

开展联合攻关  
突破核心技术

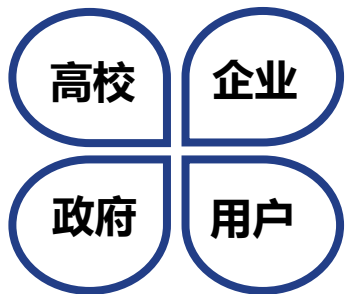
基础设施监测

深空探测

智能交通



集中优势力量



跨学科交叉融合

- 人工智能
- 控制科学
- 航空航天
- 机械设计
- 新材料
- 电子信息

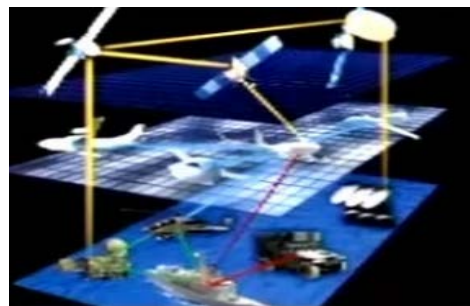
跨域无人集群协同探测

透明感知

全局认知

精智策控

跨域协同



坚持需求牵引、构建创新体系、开展联合攻关，确保我国在跨域协同无人探测系统竞争中处于领先地位，服务国防和社会经济发展。

感谢聆听！ 请批评指正！



武汉大学空间智能研究所



武汉大学



# 珞珈探索者



杨必胜 教授

陈 驰 副教授







# Thank You All!

**GISTC**  
空间智能 因融至慧

**2023地理信息软件技术大会**  
2023 Geospatial Information Software Technology Conference