

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

高维光场计算重构理论

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该成果全面系统的研究了支撑全息裸眼 3D 内容生产的高维光场计算重构理论和方法，构建了高维光场统一成像模型与光线空间投影模型的理论基础，建立了高维光场计算重构成像的方法体系，取得了具有重要科学价值和应用前景的科学发现，包括：（1）高维光场计算重构理论与模型；（2）光场空间角度一致性理论；（3）高分辨率光场及三维重建方法；（4）高动态范围神经辐射场模型及应用。这些重要发现突破了现有光场计算重构理论的局限，实现了高质量光场重建，扫清了下一代多媒体技术的理论障碍。在文化科技与现代服务业等方面具有重要科学和应用价值。

该项目 5 篇代表性论文发表于领域内顶级期刊和会议（TPAMI、JSTSP、TIP、TVCG 和 CVPR），授权国家发明专利 16 项，对下一代数字媒体系统产业链的发展做出了重要贡献，在国内外产生了深远影响，得到了国际知名学者、国内外权威刊物的高度评价。依托成果培育了多名优秀的青年学者和研究生。主要完成人全面贯彻党的教育方针，坚持为党育人，为国育才，以教书育人为核心，严谨治学。提名材料按照要求进行了公示，公示无异议。

提名该项目为陕西省自然科学奖 一 等奖。

三、项目简介

该项目属于计算机科学与技术学科中计算摄像学前沿基础领域。

空间智能是人工智能突破二维感知迈向三维物理世界的核心技术路径，能够通过单张图像生成遵循物理几何规则的可交互三维世界。它是数字与物理世界深度融合的重要方向，也是新一代信息技术集成创新与应用的战略制高点，有望通过虚实互促引领下一代互联网的发展，加速制造业的高端化、智能化升级，支撑现代化产业体系建设。全息裸眼 3D 是空间智能的关键技术特征，它连接了用户与三维数字世界，打造了非接触式沉浸交互入口。光场（Light Field）是空间中光线集合的完备表示，采集并显示光场即可在视觉上重现真实世界，实现全息裸眼 3D。然而，从传统二维平面传感器图像中恢复和处理高维光场数据是一个病态过程。因此，全息裸眼 3D 内容生产技术已成为制约空间智能发展的瓶颈问题。

根据光场成像理论，利用微透镜阵列或其他光学手段可以在单次拍摄中获取光线在不同方向上的分布，从而捕获一个场景的完整光场信息。这为全息裸眼 3D 内容生成提供了极大的灵活性，扩展了传统成像技术的应用范围。但单视光场受

限于线性光学的成像原理，无法获取场景的全自由度 3D 信息。如果能用多个光场相机从不同位置和角度对场景的光场信息进行采集，再将它们进行融合和重构，则可以从源头上解决全息裸眼 3D 内容生产所面临的技术瓶颈。

在国家自然科学基金重点项目、面上项目、国家电网科技项目等 10 余项课题资助下，团队聚焦光场成像模型、理论、计算方法和典型应用研究十余年。该项目基于光场成像理论和多视几何理论，从空间光线几何特性出发，开展了光线空间“线-线”关系规律研究，旨在探明光场相机成像机理和高维光场光线关联关系。研究内容包括四个方面：（1）高维光场计算重构理论与模型；（2）光场空间角度一致性理论；（3）高分辨率光场及三维重建方法；（4）高动态范围神经辐射场模型及应用。主要科学发现点如下：

1. 构建了光场相机统一成像模型，提出了高维光场关联理论，揭示了光线空间与三维空间的映射关系，实现了高维光场相机内参数标定、外参数注册和自标定方法，延拓和创新了光场成像理论，实现了光场成像理论与多视几何理论的融合。

通过构建光场相机多投影中心成像模型，提出了高维光场关联理论，发展了多视几何理论，延拓了计算摄像学研究领域，并实现了二者之间交叉融合。在多投影中心成像模型基础上，提出了基于特征点、共心二次曲线的光场相机标定、光场相机自标定、高维光场光线空间基本矩阵估计、基于光线空间对极几何的高维光场成像系统全参数估计等一系列高维光场计算重构核心方法，丰富和发展了光场计算理论与方法。

2. 发现了光场空间角度一致性规律，揭示了三维空间深度图与四维光场空间角度一致性尺度的线性关系，构建了光场超像素、超图等新颖的光场表达模型，提出了基于空间角度一致性的光场深度估计、超像素分割和场景流计算方法。

基于光场相机成像模型与高维光场关联理论，发现了四维光场空间与角度之间的耦合关系及变化规律，建立了精确描述光场空间与角度耦合关系的一致性模型，进一步构建了光场超像素、超图等新颖的光场表达模型，提出了光场深度估计、超像素分割、目标编辑、场景流计算等一系列光场处理方法，实现了高维光场计算重构理论与方法向计算机视觉典型任务的延伸。

3. 发现了高维光场采样的二维可预测性规律，为结构化光场空间角度联合超分辨率重建提供了理论基础；提出了从环形光场实现三维重建和稀疏采样光场的超分辨率重建方法；提出了基于高维光场的三维重建及全局优化方法。

该项目发现了高维光场采样的二维可预测性规律，提出了网格化采样、环形采样等多种形式光场的超分辨率重建深度学习网络，实现了高维光场空间角度联合超分辨率重建，突破了高维光场重建面临的“角度-空间分辨率折衷”瓶颈。在此基础上，揭示了环形光场中场景点在圆极平面体积的几何一致性规律，为从二维图像恢复物理可交互三维世界提供理论依据。同时，提出的三维重建及全局优化方法为 3D 数字内容制作和生成提供了重要技术支撑。

4. 构建了基于高维光场理论的高动态范围神经辐射场模型，提出了光场隐

式表达和新视点合成方法，研制了高质量光场获取及呈现原型系统，推动了高维光场计算重构理论与人工智能大模型的交叉和融合。

生成式 AI 大模型是人工智能领域的全球科技热点，也是全息裸眼 3D 数字内容生成最具潜力的方向。高维光场计算重构理论与深度神经网络结合的高动态范围神经辐射场模型为生成式 3D 视频提供了新的路径。针对新一代 6 自由度 VR 系统，项目研制的全景光场采集装置为真实高质量 3D 数据获取提供了有效手段，研发了 3DoF+全景光场呈现原型系统。针对下一代裸眼 3D 视频会议系统，探明了光场采集与光场显示系统的分辨率、视角、数据规模及显示精度的匹配关系，实现了全视点光场实时合成技术。项目为机器视觉、VR/AR/XR 等产业链的发展提供了数据获取及处理的解决方案。

研究成果奠定了高维光场成像模型与光线空间投影模型的理论基础，建立了高维光场计算重构成像方法体系，得到了两院院士、IEEE/ACM Fellow 在内的国际国内同行的广泛认可。国务院参事、中国人工智能学会理事长、中国工程院戴琼海院士对项目的 3 篇代表作 (1,2,3) 进行了评价。他指出：基于模型构建的高维光场相机内参数标定方法能同时用于传统光场相机与聚焦式光场相机，且不需推导外参。

该项目在 IEEE TPAMI、TIP、TVCG、TCI 以及 IJCV、计算机学报等国内外重要学术期刊和 CVPR、ICCV 等国内外重要学术会议共发表论文 56 篇，获授权国家发明专利 13 项。5 篇代表作 Google scholar 他引 468 次，专利引用 23 次。项目研究过程中培养了多名优秀博士研究生，其中 1 人获得 2021 年 CCF 优秀博士论文奖提名。该项目的理论成果已经在 IT 头部企业（华为、腾讯）进行了产业化转化，在国家电网智能运维等领域落地，在科技领域的高速目标三维成像进行了成果转化。通过以上研究，该项目团队成长为国内计算摄像学领域的主力 and 先锋，引领和推动了该研究领域的发展。

四、客观评价

项目 5 篇代表性论文谷歌学术他引 468 次（单篇最高他引 239 次）。项目成果得到包括多位两院院士，10 余位 IEEE/SPIE/IET/OSA Fellow 在内的国际国内同行认可。

科学发现 1：本发现构建的普适光场相机成像模型受到中国工程院院士戴琼海、赵耀教授等多位国内外同行关注和使用，提出的高维光场内外参数标定与注册方法被多次作为 SOTA 方法进行实验对比。部分评价内容如下：

(1) 中国工程院院士、北京信息科学与技术国家研究中心主任、中国人工智能学会理事长戴琼海等在国际知名会议 ICME 论文中对该项目的 6 参数光场多投影中心模型进行了评述，指出基于该模型构建的高维光场相机内参数标定方法能够同时用于传统光场相机与聚焦式光场相机，且不需要推导外参（代表性引文 1）。

(2) IEEE Fellow 北京交通大学赵耀教授等在国际顶级期刊 IEEE TIP 论文中评价所提出的标定方

法在光场相机畸变校正领域具有重要的应用价值（代表性引文 2）。

多位国内外知名学者将所提出的标定方法作为 SOTA 方法对比，包括：IEEE Fellow、上海科技大学虞晶怡教授，IEEE Senior Member、乔治梅森大学 Jinwei Ye 助理教授，北京市人工智能学会理事、北京师范大学段福庆教授，国防科技大学“高性能计算”国家重点实验室田羽教授等。对本发现点成果进行积极评价的领域知名学者还有：SPIE/IET/OSA Fellow、北京图象图形学学会理事长、北京理工大学王涌天教授，IET Fellow、国家杰青、天津理工大学陈胜勇教授，Optica Fellow、国家优青、南京理工大学左超教授，“鹏城学者”特聘教授、清华大学深圳国际研究生院金欣，德国卡尔斯鲁厄理工学院工业信息研究所负责人 Fernando Puente León 教授，哈尔滨工业大学航空航天热物理研究所所长谈和平教授，中国高被引学者、华南理工大学制造系统集成与控制学术团队负责人姚锡凡教授等。

科学发现 2：本发现点提出的光场空间角度一致性理论得到中国工程院院士柴天佑、中国科学院院士谭铁牛、IET Fellow 张葛祥教授、IEEE Fellow Lap-Pui Chau 教授等领域知名学者的正面评价，提出的光场超像素、超图表达模型被 IEEE Fellow Sam Kwon 教授、IEEE Fellow Ho Yo-Sung 教授等多位国内外知名学者作为典型模型引用。部分评价内容如下：

（1）中国工程院院士、IEEE/IFAC Fellow 柴天佑等在国际顶级期刊 JSTP 论文中指出该项目实现了从单一遮挡光场深度估计到多遮挡场景的理论推广，并肯定提出的光场超像素分割方法的创新性（代表性引文 3）。

（2）中国科学院院士、英国皇家工程院外籍院士、IEEE Fellow 谭铁牛等在国际顶级期刊 IEEE TIP 发表的工作中对该项目的光场空间角度一致性理论做了评述，认可该项目对复杂多遮挡场景下空间角度一致性的推导（代表性引文 4）。

（3）IEEE Fellow、香港城市大学著名学者 Sam Kwon 教授等在国际顶级会议 CVPR 中肯定了光场超像素表达模型在光场图像三维重建领域的应用价值（代表性引文 5）。

对该项目工作进行评价的领域内知名学者还包括：上海交通大学熊红凯教授，IEEE Fellow、韩国光州科技大学 Ho Yo-Sung 教授，韩国西江大学 Rae-Hong Park 教授，哈尔滨工业大学左旺孟教授、香港城市大学 Junhui Hou 教授、思科人工智能与物联网研究主席魏翔教授、芬兰坦佩雷理工大学 Ioan Tabus 教授、葡萄牙里斯本大学学院 Luís Ducla Soares 教授、波兰波兹南工业大学多媒体电信和微电子学团队负责人 Marek Domański 教授等。

科学发现 3：本发现点构建的从环形光场实现三维重建和稀疏采样光场的超分辨率重建方法受到欧洲科学院院士及 IEEE Fellow 焦李成教授，北京师范大学人工智能学院院长黄华教授等国内外同行的认可。部分评价内容如下：

（1）智能感知与图像理解教育部重点实验室主任、西安电子科技大学计算机科学与技术学部主任焦李成在期刊 TVCG 中肯定了从环形光场实现三维重建在 SLAM 领域的重要应用价值（代表性引文 6）。

(2) 北京师范大学人工智能学院院长、中国计算机学会常务理事、中国图像图形学会常务理事黄华教授在其论文中肯定了论文从稀疏视角实现三维重建的能力。

对发现点成果进行评价的领域内知名学者还包括：上海市图像图形学学会副理事长、上海大学安平教授，北京大学王选计算机研究所研究员王勇涛，天津中科智能识别产业技术研究院副院长张堃博教授等。

科学发现 4：本发现点构建的基于高维光场理论的高动态范围神经辐射场模型得到 IEEE Fellow Alan Yuille（约翰斯霍普金斯大学教授）、IEEE Fellow Ming-Hsuan Yang（加州大学教授）等领域知名学者的正面评价，提出的 HDR 建模思路、体素表示优化和约束机制被北京大学王勇涛教授等多位国内外知名学者作为典型模型引用，具体评价如下：

(1) 约翰斯霍普金斯大学教授 Alan Yuille 等在国际顶级会议 NeurIPS 论文中指出，HDR-GS 方法在高动态范围新视角合成任务中借鉴 HDR-NeRF 使用的 HDR 约束方法，并肯定了 HDR-NeRF 在高动态范围渲染和新视角合成中的创新性（代表性引文 [7]）。

(2) 加州大学教授 Ming-Hsuan Yang 与北京大学王勇涛教授等合作，在国际顶级会议论文 CVPR 中将 HDR-NeRF 视为 NeRF 在大规模动态场景表示的应用中的重要代表。（代表性引文 [8]）。

对发现点成果进行评价的领域知名学者还包括：英国剑桥大学研究员 Yi-Hsuan Lin，香港城市大学教授 Rynson W.H，南开大学教授陈明明等。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

序号	论文专著 名称	刊名	作者	年卷页 码（xx 年 xx 卷 xx 页）	发表 时间	通讯 作者	第一 作者	国内作 者	他引 总次 数	检索 数据 库	知识产 权是否 归国内 所有
1	A Generic Multi-Projection-Center Model and Calibration Method for Light Field Cameras	IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)	Qi Zhang, Chunping Zhang, Jinbo Ling, Qing Wang, Jingyi Yu	2019 年 41 卷 2539-2552 页	2019-11-01	Qing Wang	Qi Zhang	张琦, 张春萍, 王庆	57	Google scholar	是
2	Occlusion-Model Guided AntiOcclusion Depth Estimation in Light Field	IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing	Hao Zhu, Qing Wang, Jingyi Yu	2017 年 11 卷 965-978 页	2017-11-01	Qing Wang	Hao Zhu	朱昊, 王庆	89	Google scholar	是
3	4D Light Field Superpixel and Segmentation	IEEE Transactions on Image Processing	Hao Zhu, Qi Zhang, Qing Wang, Hongdong Li	2020 年 29 卷 85-99 页	2019-07-15	Qing Wang	Hao Zhu	朱昊, 张琦, 王庆	72	Google scholar	是

4	Learning Reliable Gradients from Undersampled Circular Light Field for 3D Reconstruction	IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	Zhengxi Song, Xue Wang, Hao Zhu, Guoqing Zhou, Qing Wang	2023 年第 29 卷 5194-5207 页	2022-9-13 在线发表	Qing Wang	Zhengxi Song	宋征玺, 王雪, 朱昊, 周果清, 王庆	11	Google scholar	是
5	HDR-NeRF: High Dynamic Range Neural Radiance Fields	Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition	Xin Huang, Qi Zhang, Ying Feng, Hongdong Li, Xuan Wang, Qing Wang	2022 年第 1 卷 18377-18387 页	2022-6-18	Qing Wang	Xin Huang	黄鑫, 张琦, 冯莹, 王璇, 王庆	239	Google scholar	是
合 计									468		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
王庆	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	作为负责人，系统组织了项目的理论论证和方法实施，全程参与了所有科学发现点的具体研究工作，包括研究方案的制订、理论模型的分析讨论、论文的撰写修改，是所有代表性论著的通讯作者。
周果清	2	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	主要参与了科学发现点 3、4 的研究工作。完成了光场混叠检测与降低、光场重聚焦图像增强等工作，是代表性论著 4 的作者，也是项目涉及的国家自然科学基金的主持人或主要参与者。
王雪	3	无	副研究员	西北工业大学	西北工业大学	主要参与了科学发现点 2、3 的研究工作。完成了光场频域抗混叠、光场超图表达及分割、光场相机自标定及三维重建等研究工作，是代表性论著 4 的作者，也是项目涉及的国家自然科学基金的主持人或主要参与者。

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	西北工业大学是本项目的唯一完成单位，项目组的 所有成员均为西北工业大学教师，占比 100%。所有的代表 性著作的第一作者均为西北工业大学教师或学生。西北工 业大学为本项目的完成提供了必要的研究设备、空间，以 及一定的经费支持。

八、完成人合作关系说明

目所有完成人均就职于西北工业大学计算机学院。

从 2012 年开始，第一完成人与第二完成人就三维重建、光场计算理论等内容开展合作科学研究。截止到 2023 年 5 月 31 日，共同发表学术论文 16 篇，共同获批国家发明专利 13 项，共同开展国家自然科学基金研究项目 4 项。

从 2017 年开始，第一完成人与第三完成人就光场计算理论、光场相机标定等内容开展合作科学研究。截止到 2023 年 5 月 31 日，共同发表学术论文 15 篇，共同获批国家发明专利 5 项，共同开展国家自然科学基金研究项目 2 项。