

顺序号	1914050006289
项目类别	面上项目

广东省基础与应用基础研究基金

自然科学基金项目（面上项目）

申 请 书

业务类别:	广东省自然科学基金-面上项目
项目名称:	运动物体的智能单像素成像
申请人姓名:	焦述铭
依托单位:	深圳大学
邮政编码:	518060
通讯地址:	广东省深圳市南山区南海大道3688号办公楼519
申请人电话:	13028836905
单位联系人:	王若男
单位电话:	0755-26536237
申请日期:	2019年06月10日

广东省基础与应用基础研究基金委员会
二 0 一 九 年 制

（广东科技微信公众号）



（受理纸质材料二维码）

一、简表

研 究 项 目 情 况	名称		运动物体的智能单像素成像								
	类别		广东省自然科学基金-面上项目			研究类型					
	申报学科	名称1	光学成像、图像分析与处理			代码1		F050105			
		名称2	光全息与数字全息技术			代码2		F050104			
	申请金额		10.00万元			研究期限		2019年10月 -- 2022年09月			
	所用实验室	实验室全称		深圳大学纳米光子学研究中心							
实验室类别		其他									
申 请 者 情 况	姓名		焦述铭		性别	男	身份号码	220681198901120033		民族	汉族
	职称		副研究员		学位	博士	最终学位授予国		中国香港		
	所在单位	全称		深圳大学							
		学院（所）		纳米光子学研究中心							
项 目 组 情 况	主要成员（不包括申请者）	姓名		证件号码		职 称		所在单位全称		项目中的分工	
		周振华		310107198507303457		未取得		深圳大学		成像算法设计	
		方浚丞		450703198705233013		未取得		深圳大学		实验系统设计实现	
		凡俊兴		412702199002082733		未取得		深圳大学		成像算法设计	
		高扬		342401199409048616		未取得		深圳大学		算法实现调试	
		封珺		362329199403240361		未取得		深圳大学		实验测试	
		黎锦培		441621199508095513		未取得		深圳大学		实验测试	
	人员统计		总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生	参加单位数	
7			1			1	2	3	1		

研 究 内 容 和 意 义	摘要	<p>单像素成像系统中，每次将不同的投影图案依次照射到目标物体上，通过只包含单个像素的探测器记录物体场景整体光强度，计算重建出物体图像。单像素成像在显微成像，3D成像，太赫兹成像，多光谱成像，激光雷达等方面有独特优势和巨大潜在应用价值。目前大多数单像素成像算法研究只考虑了静止场景，较少考虑动态场景，而运动物体单像素成像算法存在很多局限性。本项目分析了投影图案更新频率较快，而物体场景运动变化很慢，和前者更新频率适中，后者速度也适中，以及前者更新较慢，后者速度很快三种情况下需要解决的不同关键问题，通过“普通”“休眠”“深度休眠”智能投影模式降低投影次数冗余和器件能耗；通过机器学习实时优化设计，使得每帧图像分配最少数量、最优化的投影图案，提升动态重建结果质量；通过单帧复杂物体场景的运动估计和搜索优化，和从低质量成像结果中智能判断物体运动类型和粗略运动参数范围，降低快速运动物体重建图像的模糊和噪声。</p>
	主要研究内容和要达到的目标：	<p>(1) 研究目标</p> <p>(a) 构建出单像素成像中低冗余投影照射状态优化的模型，对于大多数时间段运动变化较慢的场景，智能控制投影器件的开启和关闭，大幅降低系统实际投影照射次数，降低器件能耗。</p> <p>(b) 在单像素成像中进行动态实时投影照射图案优化设计，对于不同的运动物体场景，使得每帧物体图像投影照射最少次数和最优设计的图案，显著提升重建结果的质量。</p> <p>(c) 对于单像素成像中投影照射图案更新频率较低，物体场景运动很快的情况，对于包含较多模糊和噪声的单帧运动物体重建图像，实现基于深度神经网络的运动类型分类判断，以及运动参数范围的粗略估计。实现单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升，降低重建图像中的模糊和噪声。</p> <p>(2) 研究内容</p> <p>(a) 单像素成像中低冗余投影照射状态优化算法</p> <p>对于投影照射图案更新频率较快且固定，物体场景大多数时间段运动变化很慢的情况，探索设计一套智能适应性控制投影照射器件的开启/关闭的工作状态，根据物体场景随时间变化情况，将系统设定为“普通模式”“休眠模式”“深度休眠模式”，并设计三种模式之间的自动切换条件。在物体场景内容没有实质变化时，将成像系统智能调节为关闭状态，缩短系统的工作时间和能耗，提升系统的效率。</p> <p>(b) 单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计</p> <p>在投影照射图案更新频率固定的情况下，探索如何实时优化设计每帧图像每个投影图案，以及不同帧投影照射次数的分配。对每帧图像，根据已经投影照射的图案和记录的单像素值，探索实时从给定的投影图案集中，预测选取或直接设计接下来若干个最优的投影图案，并通过帧间相似性大小确定每帧投影照射次数。探索使用循环神经网络和主成分分析等机器学习方法从包含大量图片的数据集中确定最优投影照射图案的设计。</p> <p>(c) 单像素成像中单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升</p> <p>探索从重建图像的模糊噪声形态，设计卷积深度神经网络模型，对物体运动类型（如平移，转动，平移加转动），物体运动参数（如平移速度，转动速度）粗略范围进行分类。探索通过运动估计的方式，从单帧复杂物体运动场景记录的数据中，重建模糊和噪声得到最大程度抑制的清晰图像。构建包含静止背景和多个运动物体前景的复杂场景的运动模型，设计同时优化前景运动物体掩模和进行多个物体运动估计的迭代算法，探索复杂场景对应的投影照射图案运动误差补偿的几何变换方式。</p>
	主题词	单像素成像 ， 运动物体 ， 智能

二、项目计划进度

序号	开始日期	结束日期	主要工作内容
1	2019-10-01	2020-09-30	进行文献回顾和前期调研，对于几种不同情况下运动物体的单像素成像，进行计算机模拟仿真，收集图片数据集用于后续的机器学习处理，搭建研究所需的单像素成像光学系统。探索单像素成像中智能休眠投影照射模式的研究及单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计研究中的第一部分的算法设计。
2	2020-10-01	2021-09-30	对于单像素成像中智能休眠投影照射模式的研究及单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计研究中的第一部分所设计的算法，进行实际单像素成像光学实验的数据采集和验证。探索单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计研究中的第二部分和单像素成像中单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升的算法设计。撰写相关论文。
3	2021-10-01	2022-09-30	对于单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计研究中的第二部分和单像素成像中单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升所设计的算法，进行实际单像素成像光学实验的数据采集和验证。探索单像素成像中运动模糊和噪声的深度神经网络分类，并使用已获得实验数据进行验证。撰写相关论文。完成课题的总结、验收及结题。

三、经费申请表

总经费及省科技厅（省基金委）经费开支预算计划：					
经费筹集情况					（单位：万元）
省科技厅 （省基金委） 经费	自筹资金				总投入经费
	自有资金	贷款	地方政府投入	其它	
10.00	0	0	0	0	10.00
政府部门、境外资金及其他资金投入情况说明：					

四、将提供的研究成果及形式

论文及专著情况	国家统计源刊物以上刊物发表论文（篇）		5		科技报告（篇）		1	
	专著（册）		0					
专利情况(项)	发明专利		实用新型专利		外观设计专利		国外专利	
	申请	授权	申请	授权	申请	授权	申请	授权
	1	1	0	0	0	0	0	0
其他								

五、前期研究基础

1. 论文收录与被引用情况统计表

论文收录情况（单位：篇）						全部论文在近5年内在SCI被引用情况	
	CSCD	CSTPCD	《SCI光盘版》	《SCI网络版》	《EI》	他人引用次数(次)	单篇被引用最高次数(次)
第一作者论文				14	2	83	23
非第一作者论文				2		19	18
通讯作者论文							

广东省自然科学基金面上项目

报告正文

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。

一、立论依据

1、**研究意义**（对基础研究，着重结合国际科学发展趋势，论述项目的科学意义；对应用基础研究，着重结合学科前沿、围绕国民经济和社会发展中的重要科技问题，论述其应用前景）。

单像素成像作为一种新型的光学成像方式[1-3]，最早起源于依靠光强随机涨落的统计关联的鬼成像[4-6]，近年来得到了研究者的广泛关注。**单像素成像的传感器只包含一个像素**，而不是具有空间分辨率的二维传感器单元阵列（如 CMOS 或 CCD 传感器）。单像素成像过程中，不同的图案会被依次照射到目标物体上，单像素探测器相应地记录下每一次照射时物体场景的整体光强度（数学上相当于物体图像和投影照射图案之间的内积），最后基于单像素值序列数据和投影图案信息，一个具有空间分辨率的二维物体图像可以计算重建出来。一定意义上，单像素成像将传感器的空间分辨率转化为光源投影照射图案的空间分辨率，将空间域的多像素同时记录转化为时间域的多次单像素记录，在一些论文中也被称作压缩感知成像[1]，图 1 是一个典型的单像素成像光学系统。**相比于普通相机，单像素成像具有诸多独特的优势**，例如在可见光以外的一些波段探测器成本低廉[2]，可以在微弱光照条件下成像，可以对视平线以外拐角物体进行成像[18]等。单像素成像在显微成像[7]，遥感成像[8]，3D 成像[9, 10]，太赫兹成像[11]，散射成像[12]，X 光成像[13]，多光谱成像[14]，图像加密及水印[15, 16]，激光雷达[17, 18]，水下成像[19]，气体泄漏监控[20]，夜视成像[21]，便携式扫描仪[22]等方面都有重要的潜在应用价值。最近在 Nature Photonics 期刊上的一篇综述论文[2]中，研究者系统回顾了过往十几年单像素成像相关的研究，并对未来前景做了展望，论文中评价道“在高性能和低成本成像系统的迫切需求下，单像素成像这种独特的技术在不久的将来无疑会获得巨大的发展空间”。

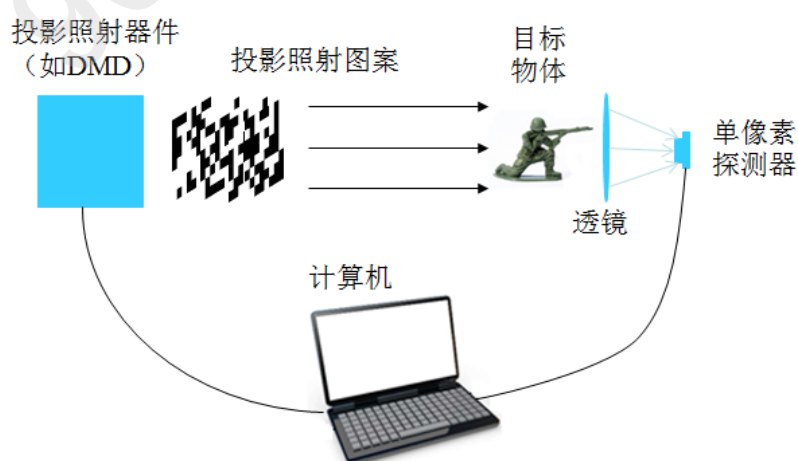


图 1 单像素成像光学系统

在以上提及的各种单像素成像的潜在应用场景中，被成像的目标物体往往都不是静止的，而是不断运动和变化的，例如在单像素显微成像中，被观测的活体细胞常常是不断运动的；在使用单像素激光雷达对行驶的车辆进行监测和成像时，车辆的位置是在不断变化的；在使用单像素成像对泄漏气

体进行成像时，气体处于不断动态扩散的状态。总体来说，在各种单像素成像应用中，运动变化的物体场景往往都是经常会遇到的情况。在这种情况下，为了记录下物体场景在时间维度上动态变化的连续过程，单像素成像系统往往需要在各个时间点获取和重建一个动态场景的很多帧图像信息，相当于拍摄一段动态场景的视频，而不仅仅是单张照片。

在单像素成像中，投影照射图案的设计和图像重建算法的设计是两个至关重要的问题。一方面，在单像素成像中，往往需要投影照射大量不同的图案，单像素探测器依次记录下足够多的数据，才能重建出物体图像来，然而如果投影图案更新频率较低，会造成获取一张图像的成像时间较长，效率较低，需要合理设计投影图案序列，实现更快更高质量的成像。另一方面，在单像素成像中，物体图像不是通过传感器单元阵列直接记录，而是基于投影照射图案信息和单像素值序列信息计算重建出来的，需要设计高质量快速的图像重建算法。当目标物体处于运动状态时，图像信息的维度从二维变为三维，相比于静止物体情形，投影照射图案和图像重建算法的设计都变得更加复杂，而且物体场景中可能既包括静止的部分（如背景），又包括多个不同的运动物体，每个物体以不同形式（如平动或转动）及速度运动，额外增加了问题解决的困难和挑战。

目前单像素成像系统中常用的投影照射器件有旋转毛玻璃片[3]，液晶空间光调制器[3]，DMD（数字微镜器件）[3]，LED 阵列[40]，相控阵列[41]等等，不同器件的投影图案刷新频率从每秒几十张到每秒几十万张不等，不同应用中的物体场景运动变化速度也各不相同，然而投影照射图案及图像重建算法的优化设计是各种不同情况普遍需要解决的问题。当投影图案刷新频率较快，运动场景大多数时间段变化速度较慢时，比较容易清晰重建出物体图像，但很多投影图案的照射和单像素值记录属于非必要和冗余，需要设计优化的算法以最少次数照射实现清晰成像，降低投影照射器件的能耗；而当投影图案刷新频率与运动场景成像所需的频率相近时，需要合理分配每一帧图像的投影照射次数，优化设计帧内先后照射的投影图案，在固定的投影照射次数内获得成像质量的最优化；而当投影图案刷新频率明显慢于运动场景变化速度时，往往系统优化设计之后重建出图像也包含严重的模糊和噪声，此时需要进行运动模型和运动参数估计，通过额外的先验信息提升重建图像质量。而物体运动速度达到一定值时，可能只在成像窗口内停留很短时间，此时需要进一步从单帧图像有限信息内进行运动估计，以实现高质量成像。

投影照射图案和高效图像重建算法的优化设计，可以使得在各种不同的场景中，单像素系统凭借尽可能少的投影照射次数和数据记录次数，获得空间分辨率和时间分辨率（帧率）都比较高的目标物体图像视频，避免和去除图像中出现模糊和噪声等问题，有利于从图像中快速提取出希望获得的物体信息，具有重要的实际应用意义。

然而目前大多数单像素成像中投影照射图案的设计和图像重建算法的设计的研究中大多数只考虑了静止状态的目标物体，较少考虑运动物体场景的情况，部分研究将时间域物体场景的变化因素纳入到算法设计中，但存在很多局限性。本项目将针对单像素成像研究领域中的动态场景这一薄弱点，开展对不同情况下运动物体的智能单像素成像算法的研究和探索。

2、国内外研究现状。

对于单像素成像中投影照射图案及图像重建算法的设计及优化[2, 3]，近年来已有很多不同的研究工作。一方面，对于随机像素值的投影照射图案，相比于传统的空间关联重建算法[6]，正则化关联重建算法[23]，迭代算法[24, 38]，深度学习算法[25, 26]，压缩感知及凸优化算法[27, 28]，都可以使得同样照射次数下，成像质量有大幅度提高，或者说以较少次数的投影照射及数据记录，实现同样的重建图像质量。另一方面，研究者也尝试了传统随机照射图案之外的各种利用基底变换的投影照射图案，例如傅立叶变换的投影图案[29, 39]，Hadamard 变换的投影图案[30, 31, 37]，小波变

换的投影图案[32], Radon 变换的图案[33]等,显著提高了成像效率。此外,除了以成像为目标以外,一些研究探索了在单像素成像投影照射次数较少的情况下进行快速的物体分类识别[34-36]。然而以上研究中大多数往往只考虑静止的物体场景,没有对于运动物体相应地优化设计投影照射图案以及图像重建算法。

目前也有一些研究工作探索了动态运动场景的单像素成像算法。按照前文所述的三种不同情形,第一种情形,即对于投影照射频率较快,运动场景变化较慢,需要降低投影次数冗余的情况,相关的研究还基本未发现。第二种情形,对于投影照射频率基本满足运动场景变化所需要的帧率的情况,过往研究[42-44]提出 3D 小波变换,3D 总变分,空域压缩感知结合时域连续性等优化的图像重建算法,在有限投影照射次数下,重建出更高质量的包含多帧图片的视频片段。但这些研究只探索了成像后的重建算法设计,未涉及成像过程中投影图案的优化设计,特别是根据前帧和本帧图像已记录的数据,适应性地实时生成下一组最优投影照射图案。过往研究[45]在动态单像素成像中,使用大量图片训练一个卷积神经网络来优化设计投影照射图案,但只考虑单帧图片的空间特征,未考虑视频中帧与帧图像之间的关联,也未进行实时优化设计。

对于第三种情形,当投影照射频率较慢,而运动场景变化很快时,仅仅通过投影照射图案和重建算法的优化方式,重建结果仍然会包括较多的模糊和噪声,难以恢复出清晰的物体图像。研究者通过前后相邻帧低质量重建图像进行运动估计[46-48],估算出物体的运动参数(如移动速度大小及方向,或转动速度大小及方向),然后根据运动参数对图像重建模型进行误差补偿(例如物体是在移动或旋转时,将投影照射图案进行反方向移动和旋转的变换),再次重建出质量提升后的结果。如果物体运动速度高于一定值,可能只会在短于一帧的成像时间内出现在成像窗口内,前后多帧的重建图像将无法获得,需要从单帧图像中进行运动估计,过往也有一定相关研究[49, 50],这一问题被看作是搜索优化问题,其中将物体运动参数作为搜索空间,重建图像质量作为搜索的目标函数。目前对于快速运动物体的单像素成像中,单帧图像的运动估计和质量提升的研究还处于比较初步的状态,有很多局限性,比如现有算法[49, 50]中限定运动场景中只包含单个物体,场景的背景为空白,物体运动的模型为已知等等,有必要设计出更加智能、无过多假设条件、与实际应用场景更加切合的运动估计和质量提升算法。此外,在物体运动类型预先未知情况下,通过包含模糊和噪声的成像结果对物体运动形态进行智能分类判断的研究以往也鲜有报道。

值得一提的是,对于普通相机拍摄动态场景时图像及视频的处理,如视频的压缩,运动模糊的去除等,相关领域的研究者进行了非常多的研究工作(如[52-56]),然而由于普通相机和单像素相机成像机制上的显著差异,这类方法并不能直接应用到运动物体的单像素成像中。

总结来说,对于静止物体场景单像素成像中投影照射图案及重建图像算法的设计优化,过往已经有了比较全面和深入的研究,但对于运动物体的动态场景单像素成像,一些研究虽有涉及,但很多关键问题还未得到解决。

3、本项目的创新之处。

(1) 对于运动物体的单像素成像问题,不同于以往工作,本项目同时考虑了相比于投影照射图案更新频率,物体运动速度(或场景变化速度)较慢,适中,较快三种不同情况,分析了每种情况所需要解决问题的差异,并设计了相应的方案。本项目不仅考虑了物体场景运动变化较快,投影照射图案更新频率无法满足需要的情况,也考虑了物体场景大多数时间段变化缓慢,投影照射图案更新频率较快产生冗余的相反情况。

(2) 过往对于静态或动态单像素成像中投影照射图案的设计优化的研究工作,都是在成像真正进

行前完成全部图案设计，而本项目探索了在成像过程中实时设计优化下一时间段若干投影照射图案的方案。

(3) 对于物体运动速度非常快，只能从单帧图像的数据中进行运动估计和重建结果质量提升的情形，本项目尝试了以往研究未涉及的**复杂物体情景：运动类型未知，同时具有静止背景和运动前景，多个物体以不同方式运动**。此外，本项目还提出了从动态单像素成像低质量重建图像中包含的噪声和模糊信息中，智能识别判断出物体的运动类型和粗略的运动参数范围，以往研究鲜有这类尝试。

4、主要参考文献及出处（格式：论文--作者．题目．刊名．年份．卷(期)．页码

/ 专著--作者．书名．出版者．年份）。

- [1] M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, T. Sun, K. F. Kelly, and R. G. Baraniuk, Single-pixel imaging via compressive sampling, IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 25(2), 83-91.
- [2] M. P. Edgar, G. M. Gibson and M. J. Padgett, Principles and prospects for single-pixel imaging, Nature Photonics, 2018, 13, 13-20.
- [3] M. J. Sun and J. M. Zhang, Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction: a brief review, Sensors, 2019, 19(3), 732.
- [4] D. V. Strekalov, A. V. Sergienko, D. N. Klyshko, and Y. H. Shih, Observation of two-photon “ghost” interference and diffraction, Physical Review Letters, 1995, 74(18), 3600.
- [5] J. H. Shapiro, Computational ghost imaging, Physical Review A 2008 78(6), 061802.
- [6] B. I. Erkmen, and J. H. Shapiro, Ghost imaging: from quantum to classical to computational, Advances in Optics and Photonics, 2010, 2(4), 405–450.
- [7] R. S. Aspden, N. R. Gemmell, P. A. Morris, D. S. Tasca, L. Mertens, M. G. Tanner, R. A. Kirkwood, A. Ruggeri, A. Tosi, R. W. Boyd, G. S. Buller, R. H. Hadfield, and M. J. Padgett, Photonsparse microscopy: visible light imaging using infrared illumination, Optica, 2015, 2 (12), 1049.
- [8] B. I. Erkmen, Computational ghost imaging for remote sensing, J. Opt. Soc. Am. A 2012, 29(5), 782–789.
- [9] B. Sun, M. P. Edgar, R. Bowman, L. E. Vittert, S. Welsh, A. Bowman, and M. J. Padgett, 3-D computational imaging with single-pixel detectors, Science, 2013, 340(6134), 844-847.
- [10] M. J. Sun, M. P. Edgar, G. M. Gibson, B. Sun, N. Radwell, R. Lamb, and M. J. Padgett, Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution, Nature Communications, 2016, 7, 12010.
- [11] W. Chan, K. Charan, D. Takhar, K. Kelly, R. Baraniuk, and D. Mittleman, A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing, Applied Physics Letters, 2018, 93(12), 121105 NSFC.
- [12] E. Tajahuerce, V. Durán, P. Clemente, E. Irlés, F. Soldevila, P. Andrés, and J. Lancis, Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection, Optics Express, 2014, 22(14), 16945-16955.
- [13] D. Pelliccia, A. Rack, M. Scheel, V. Cantelli, and D. M. Paganin, Experimental x-ray ghost imaging, Physical Review Letters, 2016, 117(11), 113902.
- [14] L. Bian, J. Suo, G. Situ, Z. Li, J. Fan, F. Chen, and Q. Dai, Multispectral imaging using a single bucket detector, Scientific Reports, 2016, 6, 24752.
- [15] W. Chen, Ghost identification based on single-pixel imaging in big data environment. Optics Express, 2017, 25(14), 16509-16516.
- [16] C. Zhang, W. He, B. Han, M. Liao, D. Lu, X. Peng, and C. Xu, Compressive optical steganography via single-pixel imaging, Optics Express, 2019, 27(9), 13469-13478.

- [17] W. Gong, C. Zhao, H. Yu, M. Chen, W. Xu, and S. Han, Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint, *Scientific Reports*, 2016, 6, 26133.
- [18] G. Musarra, A. Lyons, E. Conca, Y. Altmann, F. Villa, F. Zappa, M. J. Padgett, and D. Faccio, Non-line-of-sight 3D imaging with a single-pixel camera, 2018, arXiv preprint arXiv:1903.04812.
- [19] M. Le, G. Wang, H. Zheng, J. Liu, Y. Zhou, and Z. Xu, Underwater computational ghost imaging, *Optics Express*, 2017, 25(19), 22859-22868.
- [20] G. M. Gibson, B. Sun, M. P. Edgar, D. B. Phillips, N. Hempler, G. T. Maker, G. P. A. Malcolm, and M. J. Padgett, Real-time imaging of methane gas leaks using a single-pixel camera, *Optics Express*, 2017, 25(4), 2998-3005.
- [21] 段德洋, 国家自然科学基金青年项目, 基于鬼成像原理的一种新型夜视成像系统的理论与实验研究 (201801-202012)
- [22] Z. Zhang, Z. Su, Q. Deng, J. Ye, J. Peng, and J. Zhong, Lensless single-pixel imaging by using LCD: application to small-size and multi-functional scanner, *Optics Express*, 2019, 27(3), 3731-3745.
- [23] B. Sun, S. S. Welsh, M. P. Edgar, J. H. Shapiro, and M. J. Padgett, Normalized ghost imaging, *Optics Express*, 2012, 20(15), 16892-16901.
- [24] W. Wang, X. Hu, J. Liu, S. Zhang, J. Suo, and G. Situ, Gerchberg-Saxton-like ghost imaging, *Optics Express*, 2015, 23(22), 28416-28422.
- [25] M. Lyu, W. Wang, H. Wang, H. Wang, G. Li, N. Chen and G. Situ, Deep-learning-based ghost imaging, *Scientific Reports*, 2017, 7(1), 17865.
- [26] T. Shimobaba, Y. Endo, T. Nishitsuji, T. Takahashi, Y. Nagahama, S. Hasegawa, M. Sano, R. Hirayama, T. Kakue, A. Shiraki, and T. Ito, Computational ghost imaging using deep learning, *Optics Communications*, 2018, 413, 147-151.
- [27] O. Katz, Y. Bromberg, and Y. Silberberg, Compressive ghost imaging, *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13), 131110.
- [28] L. Bian, J. Suo, Q. Dai, and F. Chen, Experimental comparison of single-pixel imaging algorithms, *JOSAA*, 2018, 35(1), 78-87.
- [29] Z. Zhang, X. Ma, and J. Zhong, Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition, *Nature Communications*, 2015, 6, 6225.
- [30] L. Wang and S. Zhao, Fast reconstructed and high-quality ghost imaging with fast Walsh-Hadamard transform, *Photonics Research*, 2016, 4(6), 240-244.
- [31] M. J. Sun, L. T. Meng, M. P. Edgar, M. J. Padgett, and N. Radwell, A Russian Dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging, *Scientific Reports*, 2017, 7(1), 3464.
- [32] W. K. Yu, M. F. Li, X. R. Yao, X. F. Liu, L. A. Wu, and G. J. Zhai, Adaptive compressive ghost imaging based on wavelet trees and sparse representation, *Optics Express*, 2014, 22(6), 7133-7144.
- [33] D. F. Shi, J. Huang, W. W. Meng, K. X. Yin, B. Q. Sun, Y. J. Wang, K. Yuan, C. B. Chen, D. Liu, and W. Y. Zhu, Radon single-pixel imaging with projective sampling, *Optics Express*, 2019, 27(10), 14594-14609.
- [34] H. Chen, J. Shi, X. Liu, Z. Niu, and G. Zeng, Single-pixel non-imaging object recognition by means of Fourier spectrum acquisition, *Optics Communications*, 2018, 413, 269-275.
- [35] P. Latorre-Carmona, V. J. Traver, J. S. Sánchez, and E. Tajahuerce, Online reconstruction-free single-pixel image classification, *Image and Vision Computing*, 2019, 86, 28-37.
- [36] Y. Li, C. Hedge, A.C. Sankaranarayanan, R. Baraniuk, K.F. Kelly, Compressive image acquisition and classification via secant projections, *Journal of Optics*, 2015, 17, 065701-065710.
- [37] Z. Zhang, X. Wang, G. Zheng, and J. Zhong, Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging, *Optics Express*, 2017, 25(16), 19619-19639.
- [38] J. Ma, A single-pixel imaging system for remote sensing by two-step iterative curvelet thresholding,

IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(4), 676-680.

[39] L. Bian, J. Suo, X. Hu, F. Chen, and Q. Dai, Efficient single pixel imaging in Fourier space, *Journal of Optics*, 2016, 18(8), 085704.

[40] Z. H. Xu, W. Chen, J. Penuelas, M. Padgett, and M. J. Sun, 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination, *Optics Express*, 2018, 26(3), 2427-2434.

[41] Y. Kohno, K. Komatsu, R. Tang, Y. Ozeki, Y. Nakano, and T. Tanemura, Ghost imaging using a large-scale silicon photonic phased array chip, *Optics Express*, 2019, 27(3), 3817-3823.

[42] M. P. Edgar, G. M. Gibson, R. W. Bowman, B. Sun, N. Radwell, K. J. Mitchell, S. S. Welsh, and M. J. Padgett, Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors, *Scientific Reports*, 2015, 5, 10669.

[43] Z. W. Li, J. L. Suo, X. M. Hu, and Q. H. Dai, Content-adaptive ghost imaging of dynamic scenes, *Opt. Express*, 2016, 24, 7328-7336.

[44] Y. Zhang, M. P. Edgar, B. Sun, N. Radwell, G. M. Gibson, and M. J. Padgett, 3D single-pixel video, *Journal of Optics*, 2016, 18(3), 035203.

[45] C. F. Higham, R. Murray-Smith, M. J. Padgett, and M. P. Edgar, Deep learning for real-time single-pixel video, *Scientific Reports*, 2018, 8(1), 2369.

[46] D. B. Phillips, M. J. Sun, J. M. Taylor, M. P. Edgar, S. M. Barnett, G. M. Gibson, and M. J. Padgett, Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic supersampling, *Science Advances*, 2017, 3(4), e1601782.

[47] A. C. Sankaranarayanan, L. Xu, C. Studer, Y. Li, K. F. Kelly, and R. G. Baraniuk, Video compressive sensing for spatial multiplexing cameras using motion-flow models, *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2015, 8(3), 1489-1518.

[48] V. Kravets and A. Stern, Video compressive sensing using Russian dolls ordering of Hadamard basis for multi-scale sampling of a scene in motion using a single pixel camera, In *Computational Imaging III*. International Society for Optics and Photonics, 2018, 10669, 106690.

[49] E. Li, Z. Bo, M. Chen, W. Gong, and S. Han, Ghost imaging of a moving target with an unknown constant speed, *Appl. Phys. Lett*, 2014, 104(25), 251120.

[50] 申报人, M. Sun, Y. Gao, T. Lei, Z. Xie, and X. Yuan, Motion estimation and quality enhancement for a single image in dynamic single-pixel imaging, *Optics express*, 2019, 27(9), 12841-12854.

[51] D. F. Shi, K. X. Yin, J. Huang, K. Yuan, W. Y. Zhu, C. B. Xie, D. Liu, and Y. J. Wang, Fast tracking of moving objects using single-pixel imaging, *Optics Communications*, 2019, 440, 155-162.

[52] A. M. Tekalp, *Digital video processing*, Prentice Hall Press, 2015.

[53] S. Wang, X. Zhang, X. Liu, J. Zhang, S. Ma, and W. Gao, Utility-driven adaptive preprocessing for screen content video compression, *IEEE Transactions on Multimedia*, 2016, 19(3), 660-667.

[54] S. Zhu, and K. K. Ma, A new diamond search algorithm for fast block-matching motion estimation, *IEEE transactions on Image Processing*, 2000, 9(2), 287-290.

[55] Z. Pan, J. Lei, Y. Zhang, X. Sun, and S. Kwong, Fast motion estimation based on content property for low-complexity H. 265/HEVC encoder, *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2016, 62(3), 675-684.

[56] Q. Shan, J. Jia, and A. Agarwala, High-quality motion deblurring from a single image, *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3), 73.

[57] S. Lahabar, and P. J. Narayanan, Singular value decomposition on GPU using CUDA, In *2009 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing*, 2009, pp. 1-10.

[58] 申报人, P. W. M. Tsang, T. C. Poon, J. P. Liu, W. Zou, and X. Li, Enhanced autofocusing in optical scanning holography based on hologram decomposition, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(5), 2455-2463.

[59] 申报人, P. W. M. Tsang, T. C. Poon, J. P. Liu, C. C. Lee, and Y. K. Lam, Automatic decomposition

of a complex hologram based on the virtual diffraction plane framework, Journal of Optics, 2014, 16(7), 075401.

[60] H. Ou, H. Pan, E. Y. Lam, and B. Z. Wang, Defocus noise suppression with combined frame difference and connected component methods in optical scanning holography, Optics Letters, 2015, 40(17), 4146-4149.

[61] Z. B. Zhang#, 申报人#, M. H. Yao, X. Li, and J. G. Zhong, Secured single-pixel broadcast imaging, Optics Express, 2018, 26.11, pp. 14578-14591. (#: 共同一作)

[62] 申报人, C. Zhou, W. Zou, and X. Li, Non-destructive ciphertext authentication for ghost imaging in mass user environment, Laser Physics, 2018, 28(9), pp. 096203.

[63] 申报人, Z. Zhuang, and W. Zou, Fast computer generated hologram calculation with a mini look-up table incorporated with radial symmetric interpolation, Optics Express, 2017, 25(1), 112-123.

[64] 申报人, P. W. M. Tsang, and T-C. Poon, Restoration of digital off-axis Fresnel hologram by exemplar and search based image inpainting with enhanced computing speed, Computer Physics Communications, 2015, 193, 30-37.

[65] 申报人, and W. Zou, High-resolution parallel phase-shifting digital holography using a low-resolution phase-shifting array device based on image inpainting, Optics Letters, 2017, 42.3, pp. 482-485.

[66] 申报人#, Z. Jin#, C. Chang, C. Zhou, W. Zou, and X. Li, Compression of phase-only holograms with JPEG standard and deep learning, Applied Sciences, 2018, 8, pp. 1258. (#: 共同一作)

[67] K. R. Rao, Z. S. Bojkovic, and D. A. Milovanovic, Multimedia communication systems: techniques, standards, and networks, Prentice Hall PTR, 2002.

[68] R. Liu, Z. Li, and J. Jia, Image partial blur detection and classification, IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2008, pp. 1-8, IEEE.

二、研究方案

1、研究目标、研究内容和拟解决的关键问题。

(1) 研究目标

(a) 当投影照射图案更新频率较快, 物体场景大多数时间段运动变化很慢时, 构建出单像素成像中低冗余投影照射状态优化的模型, 在投影图案更新频率固定情况下, 智能控制投影照射器件的开启和关闭, 在不影响成像结果质量的前提下, 通过设置“休眠模式”和“深度休眠模式”, 大幅降低这种情况下系统实际投影照射次数, 降低器件能耗。

(b) 当投影照射图案更新频率接近于运动变化的物体场景成像所需时, 设计一套可以在单像素成像中进行动态实时投影照射图案优化设计的算法, 对于不同的运动物体场景, 可以在投影照射图案更新频率不变的情况下, 对于每帧物体图像投影照射最少次数和最优设计的图案, 相比于现有的单像素成像中投影照射图案及图像重建优化设计算法, 显著提升重建结果的质量, 确保重建动态图像空间分辨率和时间分辨力的平衡。

(c) 当单像素成像中投影照射图案更新频率较低, 物体场景运动很快时, 实现单像素成像中单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升。对于包含较多模糊和噪声的单帧运动物体重建图像, 探索基于深度神经网络的物体运动类型分类判断, 以及运动参数范围的粗略估计。探索针对复杂物体场景中静止背景和多个前景运动物体同时进行图像区域分割和运动参数估计, 明显降低重建图像中的模

糊和噪声。

(2) 研究内容

(a) 单像素成像中低冗余投影照射状态优化算法

单像素成像中，当投影照射图案更新频率较快，物体场景大多数时间段运动变化很慢时，分析单像素成像系统投影图案照射和单像素值数据记录的冗余，探索在投影照射图案更新频率固定的情况下，设计一套智能适应性控制投影照射器件的开启/关闭的工作状态的算法，缩短系统的工作时间和能耗，提升系统的效率。对于“物体场景内容随时间发生明显变化”，“场景内容不变，物体位置移动”“场景内容不变，物体位置有规律可预测的移动”三种不同情况，探索将单像素成像系统设定为“普通模式”“休眠模式”“深度休眠模式”，并设计三种不同模式之间的自动切换条件，通过“休眠模式”和“深度休眠模式”在物体场景内容没有实质变化时，将成像系统智能调节为关闭状态，降低系统能耗，使得单像素成像系统在监控等成像应用中更有效率的工作。

(b) 单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计

单像素成像中，当投影照射图案更新频率接近于运动变化的物体场景成像所需时，探索如何实时优化设计每帧图像每个投影图案，以及不同帧投影照射次数的优化分配，实现一个动态实时投影照射图案设计的智能算法方案，提升动态重建结果的质量。在每帧物体图像获取过程中，根据已经投影照射的图案和记录的单像素值，探索从预先给定的投影图案集中进行搜索，预测选取接下来若干个最优的投影图案的最优化算法，或根据该帧图像已有信息，直接设计接下来若干个最优的投影图案的算法，研究当前帧图像数据与之前帧图像相似度比较方式，通过时域帧间相似性大小智能确定该帧最终投影照射次数。探索使用循环神经网络和主成分分析等机器学习方法从包含大量图片的数据集中确定最优投影照射图案的设计。

(c) 单像素成像中单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升

单像素成像中，当投影照射图案更新频率相对较慢，而物体场景运动变化很快的情况，探索通过运动估计的方式，从单帧复杂物体场景记录的数据中，获得模糊和噪声得到最大程度抑制的清晰重建图像。探索单像素成像重建结果中模糊噪声形态与运动类型（如平移，转动，平移加转动，或其他运动模型），物体运动参数大小（如平移速度，转动速度）之间的关联。将从重建图像的模糊和噪声中判断物体运动类型和物体运动参数的粗略范围构建为图像分类识别问题，设计卷积深度神经网络模型，通过大量训练图片，对物体运动类型和参数进行一定粗略预测。构建包含静止背景和多个运动物体前景的复杂场景的运动模型，研究将不同物体对应的模糊噪声区域从背景区域分割提取的方案，设计同时优化前景运动物体掩模和多组运动参数的迭代算法，对多个物体进行运动估计和参数优化，探索复杂场景对应的投影照射图案运动误差补偿的几何变换方式。通过一系列算法，实现在单帧复杂物体场景在快速运动变化时，重建图像质量的显著提升。

(3) 拟解决的关键问题

(a) 当投影照射图案更新频率较快，而物体场景运动变化很慢时，单像素成像系统大多数时间只需要较少数量投影图案照射和单像素值数据记录，即可获得清晰的重建物体图像。如何在投影图案个更新频率固定情况下，降低系统投影照射的冗余，智能控制投影照射器件的开启/关闭的工作状态，缩短系统的工作时间和能耗，提升系统的效率，是一个需要解决的重要问题。

(b) 当投影照射图案更新频率和物体场景运动变化速度都适中，投影照射图案更新频率接近于运动变化的物体场景成像所需时，一定时间内单像素成像系统总投影照射次数固定，怎样实时适应

性地合理分配每一帧图像的投影照射次数以及每个投影照射图案的设计,使得成像结果中每帧图像的空间分辨率和多帧连续图像整体的时间分辨率得到平衡优化,重建动态图像的质量得到最大程度的提升,是一个值得研究的问题。

(c) 当投影照射图案更新频率较慢,而物体场景运动变化很快时,无论怎样对投影照射图案进行优化设计,重建图像结果都不可避免包含相当程度模糊和噪声。当物体运动速度足够快,较短时间内只能获得同一复杂场景单帧重建图像时,如何对物体运动模型进行自动分类判断,如何对图像中静止背景和多个运动物体前景混合信息进行智能处理,实现多个物体运动参数的精确估计的有效方式,最终重建图像中模糊和噪声去除以及质量的提升的优化算法设计都是有待解决的问题。

2、拟采取的研究方法、技术路线、实验方案及可行性分析。

(1) 技术路线

项目对于运动物体单像素成像中当投影照射图案更新频率较快,而物体场景运动变化很慢,和前者更新频率适中,后者速度也适中,以及前者更新频率较慢,后者速度很快三种不同情况中需要解决的三个不同的关键问题,分别进行了如下方式的探索,如图 2 所示。对于第一种情况下投影照射及数据记录冗余问题,通过单像素成像中智能休眠投影照射模式来解决,对于第二种情况下每帧图像最少数量、最优投影图案设计问题,通过单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计来解决,对于第三种情况中重建图像的模糊和噪声问题,通过单像素成像中单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升来解决。

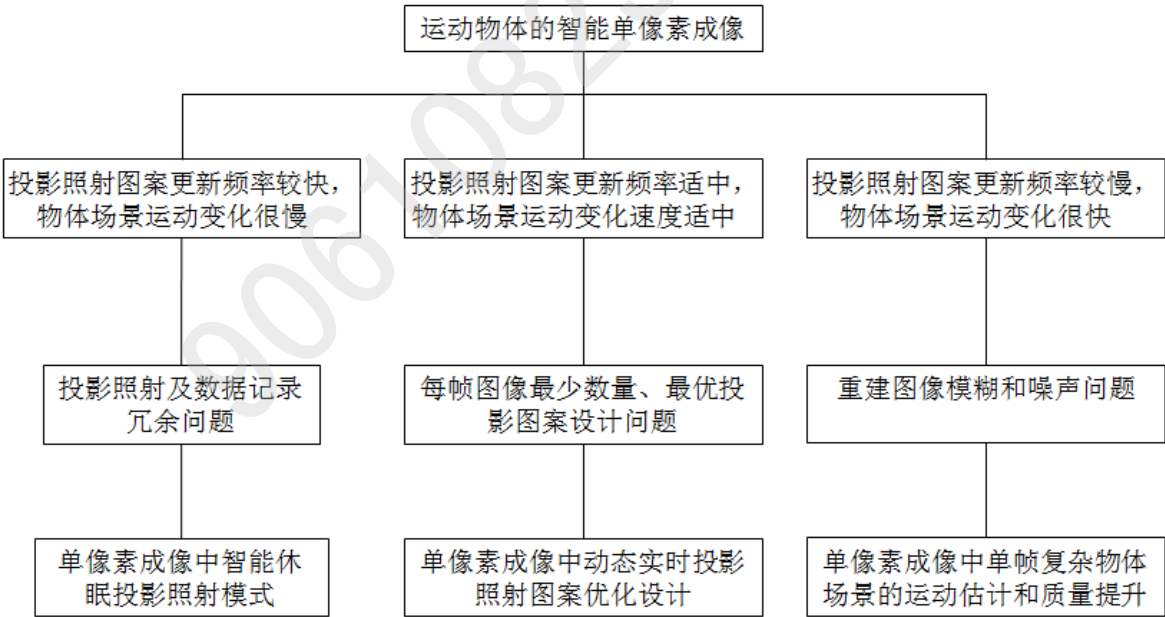


图 2 研究项目整体技术路线图

(2) 研究方法及实验方案

(a) 单像素成像中智能休眠投影照射模式

当单像素成像系统用于长时间不间断获取动态物体场景图像数据时,比如监控应用,如果投影照射图案更新频率足够快并且保持固定,而物体场景大多数时间保持不变或变化很缓慢,很多图案的投影照射和所记录的数据将意义不大,产生冗余。探索通过智能优化投影照射期间的工作状态,降低系统的冗余,明显缩短系统的工作时间和能耗,提升系统的效率。单像素成像系统的工作模式可设

置为“普通模式”“休眠模式”“深度休眠模式”，根据物体场景的动态变化情况，系统将在这三个模式之间进行切换,对于不同帧的图像采用不同模式。如图 3 和图 4 所示，三种模式的区别如下(以 Hadamard 投影照射图案为例)：

普通模式：与常规静态场景单像素成像无异，假设物体图像分辨率为 $M \times N$ 像素，采样率为 50%，则需要投影照射 $50\% \times M \times N$ 次，记录下 $50\% \times M \times N$ 单像素值序列，从获取的 Hadamard 频谱中可以重建出物体图像。

休眠模式：在假定物体图像内容不变，只是位置发生变化的情况下，系统将只获得物体的位置信息，不再重建图像，采用中心切片定理，对于物体图像的两个维度分别进行一维的 Hadamard 频谱获取，从获得两个曲线中估计物体中心位置[51]，投影次数仅需要 $M+N$ 次，远小于普通模式。

深度休眠模式：假定物体图像内容不变，并进行有规则的运动（如匀速运动），当前帧图像内容和物体位置可以根据之前若干帧的信息预测出来，在这一模式下，系统将不进行完整的两个一维 Hadamard 变换，而只采集两个一维 Hadamard 变换频谱上预测中心位置附近 K 个采样点的单像素值，投影照射次数即为 K 次（例如 $K=6$ ），目的是为了确认物体是否仍然在预测的轨迹上运动。

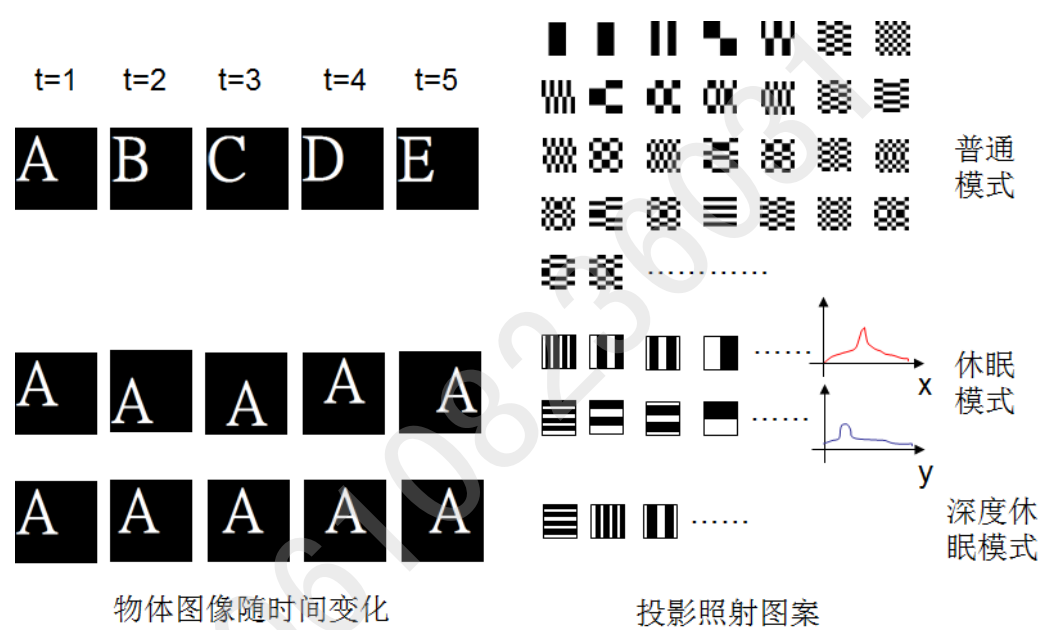


图 3 物体场景处于不同运动变化状态时，三种不同模式下的投影照射图案

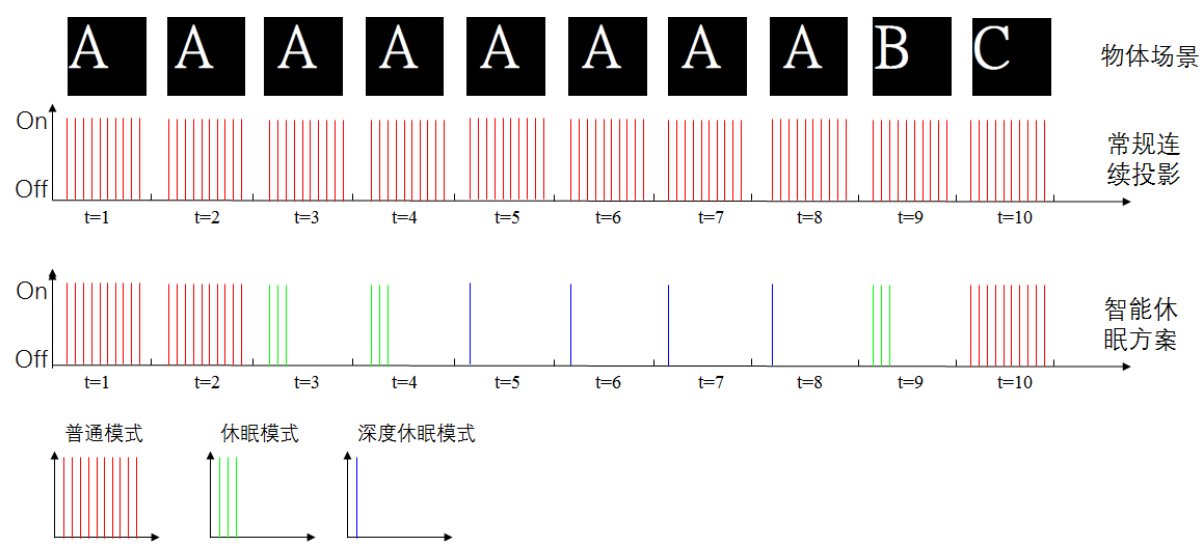


图 4 项目提出的智能休眠方案与常规连续投影区别

模式之间的切换规则如下：

普通模式：如果当前帧获取的 Hadamard 频谱或重建的物体图像与前一帧有明显差异，继续保持普通模式；如果连续若干帧重建的物体图像相关性都很高（平移、旋转、缩放到同一尺度后），进入休眠模式。

休眠模式：如果当前帧获取的两个一维 Hadamard 曲线与前一帧相比，不仅仅有物体位置的变化，还预示物体内容可能发生变化，则返回普通模式；如果从最近若干帧的两个一维 Hadamard 曲线中，可以发现物体处于规律的运动状态，如某个方向匀速移动，则构建一个相应的运动模型，同时进入深度休眠模式；其他情况则停留在休眠模式。

深度休眠模式：如果采样点的单像素值与根据运动模型估计的值有明显差异，说明物体可能不再处于原本估计的运动状态之下，需要返回休眠模式；如果采样点的单像素符合预测，则继续停留在深度休眠模式。

如果目标物体场景变化较缓慢，则大多数时间段内系统只需要保持在休眠状态和深度休眠状态，每一帧时间段内成像器件只需要照射少量投影图案和记录相应数据，其余时刻不需要进行投影，而不使用这一智能优化算法情况下，则需要每一帧内每一时刻都进行投影照射和数据记录，所提出方案可以显著降低单像素系统器件实际工作时间和能耗成本，如图 4 所示。

(b) 单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计

在单像素成像过程中，为了在投影照射图案更新频率固定的情况下（刷新率受制于投影器件物理性能），优化设计每一帧图像每一个投影图案，以及不同帧投影照射次数的分配，本项目提出了一个动态实时投影照射图案设计的智能算法方案。方案总体构架如图 5 所示，在每帧图像成像过程中，根据已经投影照射的图案和记录的单像素值，探索实时从给定的投影图案集中进行搜索，预测接下来若干个最优的投影图案，并与之前帧图像数据进行对比，通过时域帧间相似性大小智能确定该帧最终投影照射次数。

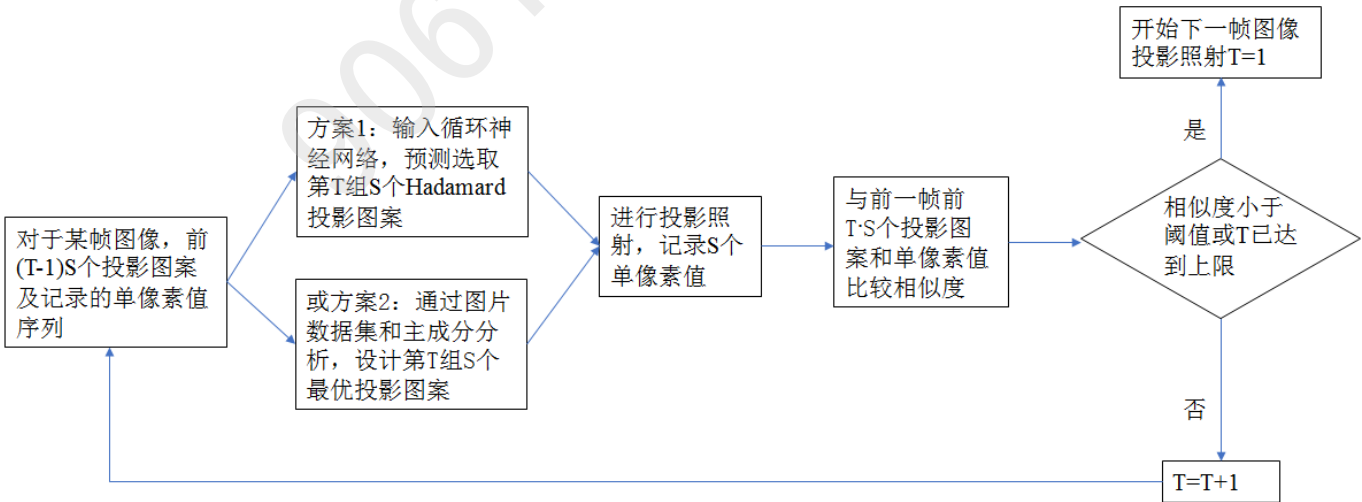


图 5 项目提出的单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计的框架

对于投影图案的实时预测和优化设计，项目申报人设想两种不同的可能方案，第一种方案中，投影照射图案为预先设计好，但对于每一帧图像，投影图案的照射先后顺序是实时优化的；第二种方案中，投影照射图案本身是动态实时优化设计的，每一帧图像的每一个投影图案都有可能不同。

第一种方案中，假设单像素成像中使用 Hadamard 投影照射图案（也可以是其他类型预先给定的随

机或基底变换投影照射图案,如傅立叶变换图案),对于每帧图像通常共需要投影 N 个不同的图案,编号为 1, 2, 3, …, N 。方案中需要预先收集一个包含与实际目标物体比较类似的足够数量图片的数据集。如果物体场景为静态,投影照射顺序的优化设计方式为:将某一个投影照射图案投影到数据集中所有图片后,如果获得的平均单像素值(即 Hadamard 频谱值)相比于其他投影图案最大,表示所有图片总体上能量最集中于这一频谱,则应该最先投影这一图案;在剩下的投影图案中,用类似的方式决定哪个图案为下一次序最优先投影的图案[31, 39]。

但这种方式下,投影照射图案先后顺序的优化都是在实际成像前预先完成的,而不是实时进行的。在本项目中,对于某一帧图像,每投影完 S 个图案,记录下 S 个数据后,这 S 个图案及数据也作为已知信息纳入到下一组 S 个图案的优化设计中。理想情况下, $S=1$,但实际中为减少投影照射过程中计算时间的成本, S 值要适当设置为一个大于 1 的值,相当于全部 N 个投影图案被分成了 $T=N/S$ 组。在进行第 T 组投影照射前,前 $T-1$ 组共 $S(T-1)$ 个投影图案都将被用于第 T 组 S 个投影照射图案的设计。具体方式为:将 N 个投影图案中所有未使用的图案依次投影到数据集里所有图片上,获得相应的单像素值,但此时不仅考虑所有图片平均上能量最集中于哪个图案的单像素值,同时考虑数据集里哪些图片对于之前投影过的 $S(T-1)$ 个图案的单像素值与当前实际目标物体获得的单像素值序列更接近(例如可以用单像素值序列的均方差大小来衡量)。在选取优先使用的投影照射图案时,对于这些可能与实际的物体图像更相似的图片增加权重,以这种方式选择最有可能的 S 个图案作为该帧图像下一组的投影图案。

由于数据集内图像数量较多,这一搜索式的方案计算量可能较大,不利于实时应用,项目中将先按照以上所设计的算法,进行大量单像素成像仿真计算,利用获得的数据,训练一个循环神经网络(Recurrent Neural Networks)来实现下一组最优图案的预测,如图 6 所示,同一个网络模块会反复使用,输入不仅包括上一组 S 个图案的编号及实际记录的单像素值,还包括之前所有组图案的信息,在研究中将优化网络模块的具体结构和参数。

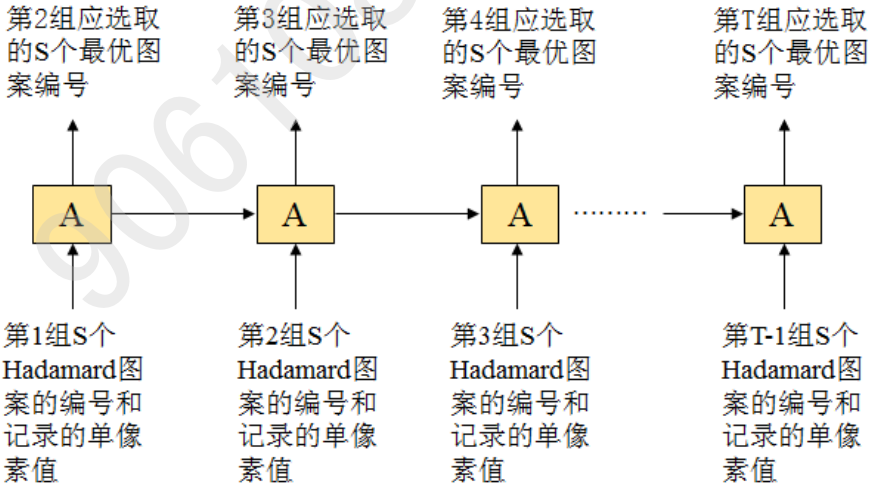


图 6 项目中用于实时预测选取投影图案的循环神经网络 (A 代表网络中的一个基本模块)

第二种方案中,不再使用预先给定的投影照射图案(如 Hadamard 图案),而是所有投影照射图案本身都是从图片数据集中动态优化获得的。首先使用主成分分析方法从图片数据集中获取中图片的前 S 个主成分,作为每一帧图像的第一组 S 个投影图案。对于后面的第 T 组投影图案,会根据前 $(T-1)S$ 个投影图案记录下的单像素值,在图片集中选出与该帧图像产生的单像素值较接近的 X 张图像,去除经过前 $(T-1)S$ 次投影图案已从这 X 张图案中获得的信息,对剩余图像信息再进行主成分分析,获得的主成分矩阵作为单像素成像中接下来第 T 组投影图案。方案中的主成分分析(或奇异值分解)运算可以通过一定计算器件(如显卡[57])或算法快速实时完成。第二种方案相比于

第一种方案可产生更高效率和质量的成像结果，但计算成本相对会更大，更适用于投影图案更新频率相对较慢，或计算器件可以较快完成计算的情形。

无论在第一种方案还是第二种方案中，动态场景中相邻帧图像之间的相似性也会被纳入考虑，每次在设计第 T 组 S 个投影照射图案之前，会先比较该帧已投影照射的 $(T-1)S$ 个图案及记录的 $(T-1)S$ 个单像素值与之前一帧图像的 $(T-1)S$ 个图案及单像素值比较，如果差异小于一定的阈值，说明该帧图像与前一帧图像非常相似，则停止该帧的投影图案照射，开始下一帧图像的投影照射。

(c) 单像素成像中单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升

假设一个单像素成像系统中，一共投影照射 N 张图案，来获取一张图像的信息，一共需要 $N\Delta t$ 的时间（投影照射器件刷新率为每秒 $1/\Delta t$ 次）。在 $N\Delta t$ 时间段内，目标场景中的多个运动物体发生了明显的位置变化，同时场景中的背景部分保持不变，这样使用普通方法重建出的物体图像将包含较多的模糊和噪声，本项目将探索设计对于单帧复杂物体场景运动估计和质量提升算法。

为了去除因物体运动速度过快造成的成像结果中严重噪声，如果物体的运动模型是已知的，可以估计物体的运动参数，对投影照射图案进行一定的几何变换，获得运动误差补偿，以重建出清晰的物体图像。如图 7 所示，当一帧成像时间内，物体处于不断运动的状态时，对应每一个不同的投影照射图案，物体都处于不同的运动状态。如果使用实际记录的单像素值序列和原始的投影照射图案进行图像重建，重建出的图像质量较差；如果对每一个时刻不同的投影照射图案进行相应不同的运动变换，然后使用变换后的图案重建物体图像，可以显著提升图像质量。具体来说，根据运动的相对性，将投影图案与物体运动相反的方式变换，若物体向右以某个速度运动，则投影图案虚拟地向左以同样速度移动（等效于物体是静止的），若物体顺时针旋转，则投影图案虚拟地逆时针以同样转动速度旋转（等效于物体是静止的）。如果使用错误的物体运动参数（即平移或转动速度），变换后的投影图案仍然无法被用于重建出高质量的结果，所以需要以重建图像质量为优化目标（如使用图像熵衡量噪声强弱），通过遗传算法或最大梯度下降等搜索算法搜索最优运动参数，实现模糊去除和重建图像质量提升。

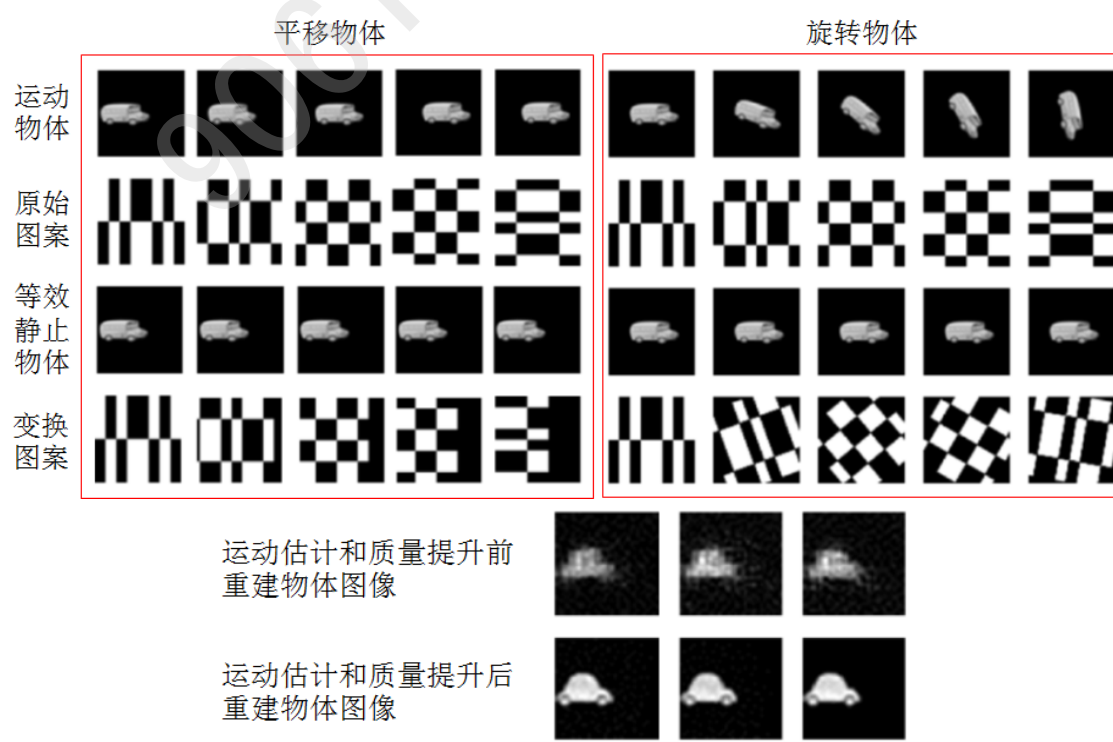


图 7 对投影照射图案进行几何变换和运动误差补偿的方式进行简单运动物体的单像素成像高质量重建

在本项目中，物体场景从单物体拓展到多个不同运动状态的物体，并且整个物体场景背景部分静止，只有前景部分处于运动状态，并且考虑了物体运动模型可能是事先未知的情况。

首先，由于不同种运动类型在重建图像结果中产生的噪声和模糊形态会有一定不同，从低质量的重建图像中可识别出物体的运动类型。此外，由于方案中最优的运动参数是搜索优化获得的，搜索空间的大小对于算法的运行速度和准确度有重要影响，如果预先可以从模糊噪声图像中粗略估计物体运动参数值的范围，例如“0 至 10”，“10 至 20”，“20 至 30”，“大于 30”几个区间中的哪一个，对于提升算法整体性能会有显著帮助。**物体运动类型的判断，和物体运动参数区间的粗略估计，都可以看作是一个图像分类问题**，项目中将利用深度卷积神经网络解决这两个分类问题。对于大量不同的物体图片，模拟仿真它们在进行不同类型的运动、不同运动速度下单像素成像的过程和结果，作为训练数据。使用普通算法重建出包含模糊和噪声的单帧图像将作为网络的输入，分类结果作为网络的输出。网络中将包括若干卷积层、池化层、全连接层，最终通过 Softmax 层进行分类，如图 8 所示。项目所设计的深度卷积神经网络将通过提取输入图像中的有效特征，来从包含模糊和噪声的重建图像中预测出物体的运动类型，或同一运动类型的物体运动速度的初略范围。

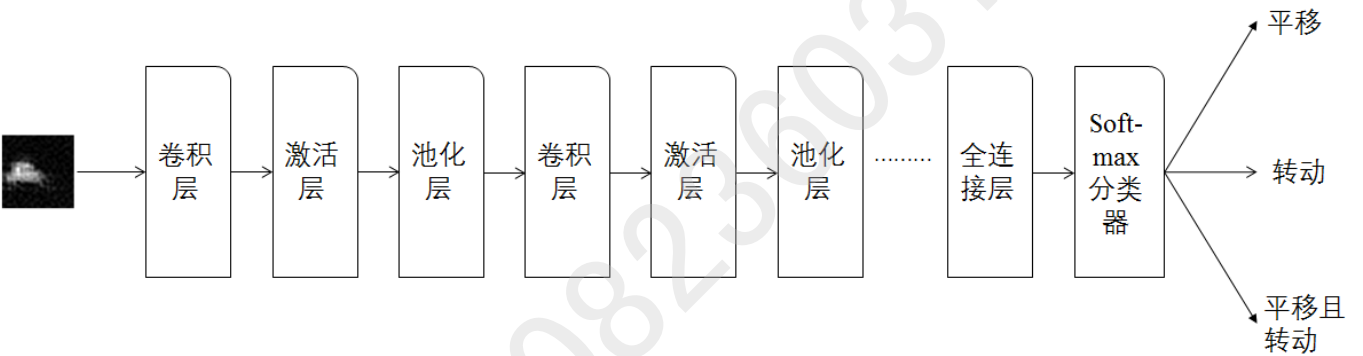


图 8 从单像素成像中重建图像包含的模糊和噪声进行物体运动类型分类和运动参数粗略估计的全卷积神经网络模型

在此基础上，假设场景 $I(All)$ 中包括静止的背景 $I(Back)$ ，和两个运动的物体 $I(A)$ 和 $I(B)$ ，更多数量物体的情况也可以以此类推。假设物体 A 和物体 B 所占据的前景区域范围可以用不同的掩膜(Mask)即 $M(A)$ 和 $M(B)$ 表示，在每个掩膜中背景（包括静止的背景区域和其他运动物体区域）像素值为 0，该物体前景区域像素值为 1，静止背景部分的掩膜可以用 $M(Back)=1- M(A)- M(B)$ 来表示。当物体移动到不同位置时，掩膜也相应发生变化，例如在两个不同时刻整个物体场景可以如图 9(a)和(b)所表示，物体 A(汽车)从左向右运动，物体 B(飞机)从右向左运动。

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad I(\text{All}) &= I(\text{A}) \times M(\text{A}) + I(\text{B}) \times M(\text{B}) + I(\text{Back}) \times M(\text{Back}) \\
 \text{(b)} \quad I(\text{All}) &= I(\text{A}) \times M(\text{A}) + I(\text{B}) \times M(\text{B}) + I(\text{Back}) \times M(\text{Back}) \\
 \text{(c)} \quad H(\text{All}) &= H(\text{A}) \times M(\text{A}) + H(\text{B}) \times M(\text{B}) + H(\text{Back}) \times M(\text{Back})
 \end{aligned}$$

图 9 多个运动物体在时刻 1 (a) 和时刻 2 (b) 掩模的变化及整体场景图像的变化；(c)运动误差补偿和几何变换后的投影照射图案组合方式

假设对于某帧图像，物体 A 和 B 的运动模型和参数都是已知的，物体 A 和 B 的掩模 $M(A)$ 和 $M(B)$ 也是已知的，为了对所有投影图案进行运动误差补偿，按照与物体 A 相反的运动方式，可以得到一组变换后的投影图案 $H(A)$ ，按照与物体 B 相反的运动方式，可以得到一组变换后的投影图案 $H(B)$ ，对于静止背景部分，仍使用原始未变换的投影图案，最后对于整个运动场景，变换后的投影图案 $H(\text{All})$ 应为图 9(c) 所示。

在搜索优化过程中，相比于单物体无背景情况下只有运动参数是需要估计和优化的变量，各个物体的掩模区域同样是需要优化的未知量。掩模区域准确分割和重建图像清晰重建两者之间是“鸡”和“蛋”的关系，只有准确分割出掩模区域，才能更清晰地重建物体图像；而只有重建出清晰的图像，才能从图像中准确分割出物体区域，项目中将采用多次迭代算法解决这一问题，如图 10 所示。

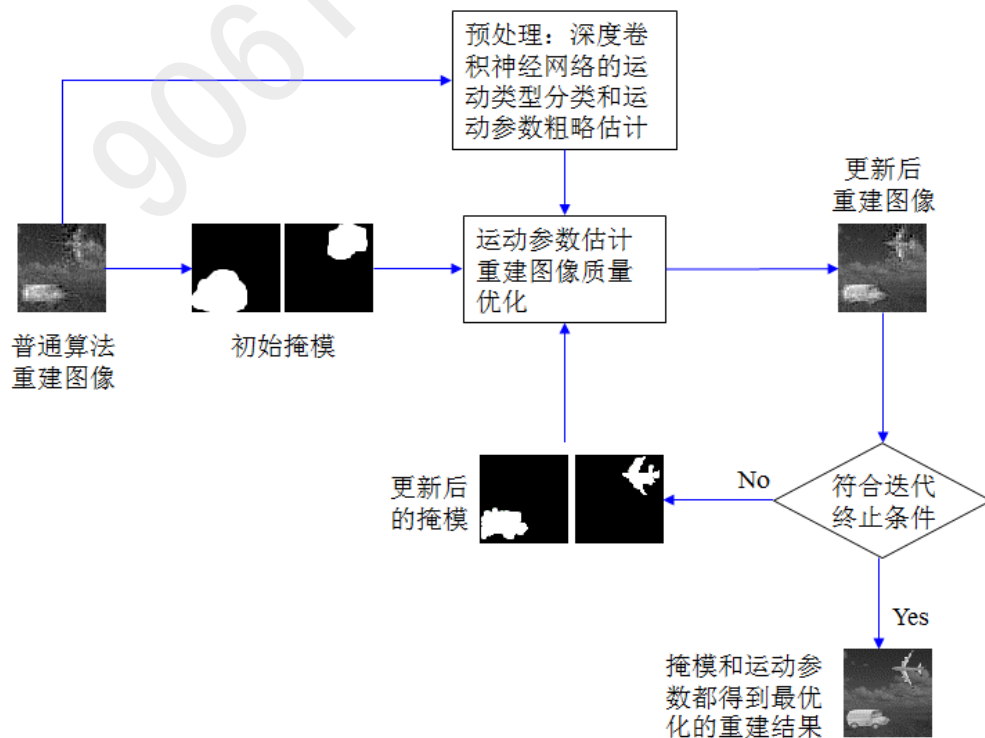


图 10 快速运动物体单像素成像中单帧复杂场景的运动估计和质量提升整体方案

在使用常规方法重建的图像中，运动物体附近区域会相对模糊，包含较多噪声，将整张重建图片划分为小的方块区域，评估每个方块区域的一些图像特征（如像素强度值的方差，图像熵，边缘强度，梯度等），通过这些局部特征指标的差异，分割出图像中两个最大的模糊噪声区域（类似于全息重建图像模糊散焦的分割提取[58-60]）。这两个区域对应的掩模作为优化时的初始掩模，通常这一初始区域覆盖的范围会明显大于实际清晰物体对应的掩模区域范围。在初始掩模基础上，搜索优化最优运动参数（即例子中物体 A 和 B 的水平竖直运动速度），在获得最优运动参数，重建出质量提升后的图像后，在两个初始掩模对应的区域内再次进行图像分割，提取出相对更准确的实际物体掩模区域范围，之后再以新的掩模为基础进行搜索优化和重建图像，以多次迭代的方式，最终获得精确的物体区域，同时也得到了优化后噪声模糊得到最大程度抑制、最为清晰的重建图像。

（3）可行性分析

(a)对于静态场景的单像素成像中投影照射图案和图像重建算法的优化问题，过往已有大量研究证明，合理设计的智能算法可以大幅度提升成像系统的效率和成像结果的质量。在动态场景的单像素成像，尽管增加了时间这一维度，通过智能优化算法改进光学成像过程同样是可行的。对于运动物体场景的单像素成像，已有的研究也从一些角度证明，优化的算法可以改进成像中的诸多局限和不足，本项目在此基础上进行了拓展，解决现有研究尚未解决的一些关键问题。例如此前有研究证实了单像素成像中，空白背景单个物体运动场景的运动估计和质量提升，本项目将在此基础上探索多物体复杂场景的运动估计和质量提升。

(b)尽管普通相机拍摄照片和视频的过程，和单像素成像在机理上有显著不同，但普通图像音频视频处理中一些智能算法的广泛应用，可以侧面证明本项目中提出的动态单像素成像中的优化设计算法的可行性。例如在音视频信号的处理[67]中，自适应预测编码和采样，如自适应增量调制(adaptive delta modulation)和差分脉冲编码调制(DPCM, Differential Pulse Code Modulation)，被广泛用于数据量压缩和冗余的降低，与本项目中动态单像素成像中投影照射工作状态的智能开启和关闭，以及投影照射图案的实时优化设计有共通之处。再如，过往有研究[68]证明了可以从普通照片的模糊区域图像特性中自动判断其属于运动模糊还是失焦模糊，而本项目中则从单像素成像重建图像结果中对不同类型运动物体造成的模糊噪声进行分类。

(c)本项目侧重使用机器学习类型算法来优化运动物体的智能单像素成像过程，近年来以深度学习为代表的机器学习方法在普通图片视频处理，全息成像，显微成像，光场成像，静态单像素成像等很多领域都有大量使用，此类方法的有效性和可行性得到了相当程度的证明，本项目将这类机器学习方法应用于运动物体单像素成像中一些普通非机器学习算法难以直接解决的问题。

(e)申报人所在的实验室具有支持项目研究的各种软硬件条件，项目申报人及其团队成员在与项目有关的单像素成像，图像处理，机器学习等方面具有一定研究积累，并取得了相当的成果，过往多项研究工作和本研究项目在内容和方法上有密切联系。项目申报人及其团队成员有能力胜任本项目中的研究任务。目前项目申报人也进行了一些前期的初步仿真模拟尝试，初步证明项目研究方向的可行。

3、年度研究计划及预期研究成果。

年度研究计划：

(a) 2019 年 10 月-2020 年 9 月

进行文献回顾和前期调研，对于几种不同情况下运动物体的单像素成像，进行计算机模拟仿真，收集图片数据集用于后续的机器学习处理，搭建研究所需的单像素成像光学系统。探索单像素成像中智能休眠投影照射模式的研究及单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计研究中的第一部分的算法设计。

(b) 2020 年 10 月-2021 年 9 月

对于单像素成像中智能休眠投影照射模式的研究及单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计研究中的第一部分所设计的算法，进行实际单像素成像光学实验的数据采集和验证。探索单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计研究中的第二部分和单像素成像中单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升的算法设计。撰写相关论文。

(c) 2021 年 10 月-2022 年 9 月

对于单像素成像中动态实时投影照射图案优化设计研究中的第二部分和单像素成像中单帧复杂物体场景的运动估计和质量提升所设计的算法，进行实际单像素成像光学实验的数据采集和验证。探索单像素成像中运动模糊和噪声的深度神经网络分类，并使用已获得实验数据进行验证。撰写相关论文。完成课题的总结、验收及结题。

预期研究成果：

- **理论层面上**，设计出一系列新型智能单像素成像相关算法，可以在系统中不同投影照射图案更新频率和不同物体场景运动变化速度的情况下，提升成像系统的效率，降低空间域和时间域的图像信息冗余，同等硬件条件下显著提升重建图像结果的质量。
- **应用层面上**，将所设计的运动物体智能单像素成像算法与实际应用场景中的单像素成像光学系统相结合，在申报人所在实验室正在进行的其它相关研究项目（如显微成像和激光雷达）中，提升对于动态目标物体的成像效果。
- 发表 SCI 收录论文 4~6 篇，其中 JCR 分区 2 区及以上收录论文至少 3 篇。
- 申请国家发明专利 1~2 项。
- 培养研究生 1-3 名。

三、研究条件与基础

1、已取得的研究工作成绩及与本项目有关的研究工作积累（请着重填写申报人近期的主要工作业绩以及与本项目相关的研究工作积累）。

项目申报人近几年从事了大量有关光学计算成像中图像处理算法的研究工作,在 IEEE Transactions on Industrial Informatics (中科院 JCR 一区期刊,影响因子:5.430), Computer Physics Communications (中科院 JCR 一区期刊,影响因子:3.936), Optics Express (中科院 JCR 二区期刊,影响因子:3.356), Optics Letters (中科院 JCR 二区期刊,影响因子:3.589)等知名期刊上以第一作者发表过多十余篇论文,曾入选2012年香港特区政府 Hong Kong PhD Fellowship Scheme 和2016年广东省“珠江人才计划”海外青年人才引进计划(博士后资助项目),在中国光学工程学会举办的第二届国际三维图像获取与显示技术应用研讨会上获得优秀论文奖,曾获得国家自然科学基金青年项目和中国博士后科学基金项目资助。担任 Optics Letters, Optics Express, Photonics Research, IEEE Transactions on Industrial Informatics 等知名期刊审稿人。在过往研究经历和成果的基础上,有能力承担本项目中的研究任务。项目申报人在与本项目有关的单像素成像,图像处理,机器学习等领域都有过大量研究工作积累,并且取得了相当的研究工作成绩,过往多项研究工作与本研究项目在内容和方法上有密切联系。

例如最近项目申报人已第一作者发表在 Optics Express 的论文[50]中,对于快速运动物体的单像素成像重建图像中的模糊和噪声问题,提出了一种预先假设物体运动模型,通过搜索最优的运动参数,对投影照射图案进行相应的几何变换,通过实际记录的单像素值序列和运动误差补偿后的投影照射图案,重建出质量显著提升的物体图像的创新方法。该研究可作为本项目部分研究内容的前期基础,本项目针对该方案具有的只适用于运动模型已知、单一物体、空白背景的局限性,将进行进一步深入的研究和探索。

此外,近期项目申报人和合作者作为共同第一作者在 Optics Express 上发表的另一篇论文[61]中,探索了在使用哈达玛投影照射图案的单像素成像系统中如何实现物体图像加密,突破了过往研究中仅仅使用随机投影照射图案实现单像素成像加密的局限,可以使得在同样投影照射次数下,解密重建图像的质量有明显提升,设计实现一种同时具有高成像质量和高安全性的单像素成像系统。在另一项工作[62]中,申报人设计了一种允许大量用户同时对单像素成像系统输出的单像素值序列数据进行无损真伪认证的机制。

项目申报人在单像素成像之外的其他类型光学成像系统的图像处理方面也有相当的研究经验,类似的图像处理算法在本项目中也发挥着重要作用。例如项目申报人近期以第一作者在 Optics Express 上发表的一篇论文[63]中,探索了在计算机快速计算全息图研究中,使用主成分分析方法进行特征提取,实现计算机快速生成全息图的查找表数据有效压缩,而主成分分析方法在本项目中也作为从图片数据机中对单像素成像投影照射图案优化的方法之一。在另一篇以第一作者发表在 IEEE Transactions on Industrial Informatics 上的论文[58]中,项目申报人使用图像分割算法将全息图重建的清晰聚焦图像或模糊离焦图像从背景进行分割提取,而在本项目中,多个运动物体的模糊噪声区域也需要从静止背景部分进行智能分割,两者在使用的图像处理方法上具有一定联系。此外,在此前第一作者发表在 Computer Physics Communications 和 Optics Letters 的论文[64, 65]中,项目申报人尝试使用蜂群算法智能优化了基于样本复制的图像修补算法,快速高质量地修复数字全息图中

的缺损区域，而搜索优化算法在本项目的部分内容（如运动参数的估计）中，也发挥着必不可少的作用。

深度学习将作为本项目研究过程中重要的机器学习工具，例如循环神经网络将用于最优投影照射图案的预测选取，卷积神经网络将用于物体运动类型的分类和运动参数粗略估计，而项目申报人在过往也有一定使用深度学习神经网络进行进行光学图像处理的研究经验。在此前以共同第一作者发表的一篇论文[66]中，申报人和合作者使用卷积神经网络对于 JPEG 压缩后的全息图中的质量下降进行修复，取得了良好的效果。

项目申报人以**第一作者（或共同第一作者）**发表的部分代表性期刊论文：

- 申报人, P. W. M. Tsang, T. C. Poon, J. P. Liu, W. Zou, and X. Li, Enhanced Autofocusing in Optical Scanning Holography Based on Hologram Decomposition, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5), pp. 2455-2463. (中科院 JCR 一区期刊, 影响因子: 5.430)
- 申报人, and W. Zou, High-resolution parallel phase-shifting digital holography using a low-resolution phase-shifting array device based on image inpainting, Optics Letters, 2017, 42(3), pp. 482-485. (中科院 JCR 二区期刊, 影响因子: 3.589)
- 申报人, Z. Zhuang, and W. Zou, Fast computer generated hologram calculation with a mini look-up table incorporated with radial symmetric interpolation, Optics Express, 2017, 25(1), pp. 112-123. (中科院 JCR 二区期刊, 影响因子: 3.356)
- 申报人, M. Sun, Y. Gao, T. Lei, Z. Xie, and X. Yuan, Motion estimation and quality enhancement for a single image in dynamic single-pixel imaging, Optics Express, 2019, 27(9), pp. 12841-12854. (中科院 JCR 二区期刊, 影响因子: 3.356)
- 申报人, P. W. M. Tsang and T-C. Poon, Restoration of digital off-axis Fresnel hologram by exemplar and search based image inpainting with enhanced computing speed, Computer Physics Communications, 2015, 193, pp. 30-37. (中科院 JCR 一区期刊, 影响因子: 3.936)
- Z. Zhang#, 申报人#, M. Yao, X. Li, and J. Zhong, Secured single-pixel broadcast imaging, Optics Express, 2018, 26(11), pp. 14578-14591. (#: 共同一作, 中科院 JCR 二区期刊, 影响因子: 3.356)
- 申报人, C. Zhou, Y. Shi, W. Zou, and X. Li, Review on Optical Image Hiding and Watermarking Techniques, Optics & Laser Technology, 2019, 109, pp. 370-380.
- 申报人#, Z. Jin#, C. Chang, C. Zhou, W. Zou, and X. Li, Compression of phase-only holograms with JPEG standard and deep learning, Applied Sciences, 2018, 8, pp. 1258. (#: 共同一作)
- 申报人, P. W. M. Tsang, T. C. Poon, J. P. Liu, C. C. Lee and Y. K. Lam, Automatic decomposition of a complex hologram based on the virtual diffraction plane framework, Journal of Optics, 2014, 16(7), pp. 075401.
- 申报人, W. Zou, and X. Li, QR code based noise-free optical encryption and decryption of a gray scale image, Optics Communications, 2016 387, pp. 235-240.
- 申报人, C. Zhou, W. Zou, and X. Li, Non-destructive ghost authentication for single-pixel imaging in mass user environment, Laser Physics, 2018, 28(9), pp. 096203.
- 申报人 and H. Yoshikawa, Fast computer simulation of reconstructed image from rainbow hologram based on GPU, Optical Review, 2015, 22(5), pp. 841-843.

2、已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径（包括利用国家重点实验室和部门开放实验室的计划与落实情况）。

申报人所在单位拥有广东省光学工程攀峰重点学科和“广东省/教育部光电子器件与系统重点实验室”研究平台。该平台有设施先进、功能完善、配套齐全、总面积达 8200 平米的现代化实验室，具有万元以上先进的科研仪器设备 500 余台套，仪器设备总值超过 1.5 亿元，目前该平台正在申报国家级重点实验室。申报人所在的实验室在微纳光学、光学成像、超表面器件、光学涡旋、矢量光束、高灵敏传感、光镊、SERS 等领域有深厚的研究基础，实验室成员近年来在 Nature Communications, Nature Physics, Laser & Photonics Reviews, Light: Science & Applications 等顶级期刊上发表过多篇论文。

目前实验室拥有进行单像素成像实验所需的激光和 LED 光源，投影仪，德州仪器 DLP7000 DMD 数字微镜器件，三种不同型号的 Thorlabs 单像素光电探测器，NI USB-6216 数据采集卡，以及光学实验台，透镜，CCD 图像传感器等设备器件。对于本项目中主要侧重的算法方面研究，申报人及所在实验室拥有进行计算光学成像，图像处理，计算机视觉，深度学习算法研究所需的各种软硬件条件，如高性能服务器，显卡和各种图像处理工具软件。申报人和项目组成员在光学成像，图像处理，计算机视觉，机器学习，模式识别等方面以往积累了一批可移植的算法。

这些软硬件配备为本项目的研究工作创造了良好的工作条件。此外，项目申报人还和国内外多家单像素成像领域的实验室保持紧密联系和合作。目前申请者所在实验室尚缺少进行一些新型高速投影的单像素成像光学实验所需的设备和器材，如 LED 光源阵列，FPGA 计算器件等，希望通过项目基金资助来购买。

六 、 附件信息

序号	附件名称	附件类型	附件说明
1	申报材料真实性承诺函	申报材料真实性承诺函	申报材料真实性承诺函
2	项目计划书	申请人承担国家或省自然科学基金项目的合同书	项目计划书
3	项目批准书	申请人承担国家或省自然科学基金项目的合同书	项目批准书
4	高级职称证书	高级职称证书	高级职称证书
5	博士后科学基金证书	其他	博士后科学基金证书
6	论文Motion estimation and quality enhancement for a	论著	论文Motion estimation and quality enhancement for a
7	论文Secured single-pixel broadcast imaging	论著	论文Secured single-pixel broadcast imaging
8	论文Enhanced Autofocusing in Optical Scanning Hologr	论著	论文Enhanced Autofocusing in Optical Scanning Hologr
9	论文Compression of Phase-Only Holograms with JPEG St	论著	论文Compression of Phase-Only Holograms with JPEG St
10	论文Fast computer generated hologram calculation wit	论著	论文Fast computer generated hologram calculation wit

申 请 人:	焦述铭	依托单位:	深圳大学
项目名称:	运动物体的智能单像素成像		
资助类别:	广东省自然科学基金-面上项目		

我保证上述填报内容的真实性。如果获得资助，我与本项目组成员将严格遵守广东省基础与应用基础研究基金委员会的有关规定，切实保证研究工作时间，按计划认真开展研究工作，按时报送有关材料。若填报失实和违反规定，本人将承担全部责任。

我保证有关申报内容的真实性。如果获得资助,我将严格遵守广东省基础与应用基础研究基金委员会的有关规定,切实保证研究工作时间,加强合作、信息资源共享,认真开展工作,及时向项目负责人报送有关材料。若个人信息失实、执行项目中违反规定,本人将承担相关责任。

编号	姓名	工作单位名称	项目分工	每年工作时间 (月)	签字
1	周振华	深圳大学	成像算法设计	6	
2	方浚丞	深圳大学	实验系统设计实现	6	
3	凡俊兴	深圳大学	成像算法设计	6	
4	高扬	深圳大学	算法实现调试	6	
5	封珺	深圳大学	实验测试	6	
6	黎锦培	深圳大学	实验测试	6	

已按申报要求对申请人的资格和申请书内容进行了审核。申请项目如获资助，我单位保证对研究计划实施所需要的人力、物力和工作时间等条件给予保障，严格遵守广东省基础与应用基础研究基金委员会有关规定，督促项目负责人和项目组成员以及本单位项目管理部门按照广东省基础与应用基础研究基金委员会的规定及时报送有关材料。