

基于暗场稀疏先验的 QDPC 相位重建与缺陷检测

曾子铭¹, 夏宇轩¹, 刘玄玉^{2*}, 王艳华¹, 李好¹, 涂雨轩¹

1. 深圳职业技术大学 广东 深圳 518055

2. 深圳市宣恒医疗科技有限公司, 广东 深圳 518102

DOI: 10.61369/TACS.2026040026

摘 要： 定量差分相衬 (Quantitative Differential Phase Contrast, QDPC) 成像作为一种非干涉定量相位恢复技术, 在无标记生物样本成像中具有重要应用。然而, 传统 QDPC 重建算法未充分考虑成像系统的内在特性, 导致重建质量易受噪声和背景波动影响。近年来, 研究者提出利用暗场稀疏先验 (Dark-field Sparse Prior, DSP) 改进 QDPC 相位重建, 通过 L0 范数优化实现高保真度相位恢复。本文系统阐述了暗场图像与 QDPC 相位重建的基本原理, 分析了 DSP 方法的核心思想与数学实现, 并探讨了其在缺陷检测领域的应用潜力。

关 键 词： 定量差分相衬; 暗场稀疏先验; 相位重建; 缺陷检测; L0 范数

QDPC Phase Reconstruction and Defect Detection Based on Dark-Field Sparse Prior

Zeng Ziming¹, Xia Yuxuan¹, Liu Xuanyu^{2*}, Wang Yanhua¹, Li Hao¹, Tu Yuxuan¹

1. Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen, Guangdong 518055

2. Shenzhen Xuanheng Medical Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518102

Abstract： Quantitative Differential Phase Contrast (QDPC) imaging, as an interferometry-free quantitative phase recovery technique, has important applications in label-free biological sample imaging. However, traditional QDPC reconstruction algorithms do not fully consider the inherent characteristics of the imaging system, making the reconstruction quality susceptible to noise and background fluctuations. In recent years, researchers have proposed using the Dark-field Sparse Prior (DSP) to improve QDPC phase reconstruction, achieving high-fidelity phase recovery through L0-norm optimization. This paper systematically elaborates the basic principles of dark-field imaging and QDPC phase reconstruction, analyzes the core idea and mathematical implementation of the DSP method, and discusses its potential application in the field of defect detection.

Keywords： quantitative differential phase contrast; dark-field sparse prior; phase reconstruction; defect detection; L0-norm

引言

在光学显微成像领域, 定量相位成像技术能够对透明样本 (如活细胞、组织切片) 进行无标记观测, 避免了荧光标记可能带来的光毒性和光漂白问题。其中, 定量差分相衬 (Quantitative Differential Phase Contrast, QDPC) 成像因其系统结构简单、成像速度快、定量精度高等优势, 成为生物医学研究的重要工具^[1]。

QDPC 的基本原理是通过非对称照明获取多幅相衬图像, 利用相位传递函数 (Phase Transfer Function, PTF) 进行反卷积重建, 从而恢复样本的定量相位分布。然而, 这一过程面临两个关键挑战: 一是 PTF 本身具有带限特性, 属于病态逆问题, 对噪声极其敏感; 二是实验采集的原始图像中不可避免地存在相机噪声和背景波动, 这些扰动会在重建相位中放大为伪影。传统方法通过硬件升级 (如高信噪比相机、优质光源) 或算法改进 (如 L2 范数正则化、全变分正则化) 来缓解上述问题, 但均未充分利用 QDPC 成像的内在物理特性。Zhang 等人^[2] 提出的暗场稀疏先验 (Dark-field Sparse Prior, DSP) 方法, 从图像本质出发, 利用暗场图像在理想情况下的稀疏特性, 实现了无需修改硬件的高保真度 QDPC 重建。本文将系统阐述这一方法的原理、实现及其在缺陷检测中的应用前景。

项目信息: 本文受广东大学生科技创新培育专项资金资助项目、教育部职业院校中国特色学徒制教学指导委员会研究课题 2025 年度重点项目 (ZJZX078)、广东省教育厅科研项目 (2025ZDZX3070)、深圳职业技术大学校级科技类项目 (6023310004K)、深圳职业技术大学 2025 年度“创新创业教育专项”《创新思维》深耕课程项目 (401300107)、深圳职业技术学院博士后出站后期资助项目、深圳职业技术大学 2025 年度学校质量工程校级 (重点) 教研项目 (7025310500)、深圳职业技术大学专创融合示范课程项目《智能网联汽车技术应用》、广东省科技创新战略专项资金 (大学生科技创新培育) 攀登计划项目 (pdjh2026bc380) 资助。

通信作者: 刘玄玉

一、暗场图像与 QDPC 相位重建原理

（一）差分相衬成像的物理机制

QDPC 成像系统通常采用 4-f 光学结构^[3]，通过可编程 LED 或 LCD 阵列产生非对称照明模式。以单轴方向为例，分别采集左、右斜入射照明下的两幅强度图像 I_{left} 和 I_{right} ，计算差分相衬图像：

$$S = \frac{I_{left} - I_{right}}{I_{left} + I_{right}} \quad (1)$$

该归一化差分操作能够有效消除背景成分，保留与样本相位梯度相关的对比度信息。根据弱物体近似，差分相衬图像 S 与样本相位 Φ 之间的关系可表示为卷积过程^[2]：

$$S = H \otimes \Phi + \epsilon \quad (2)$$

其中 H 为系统点扩散函数（Point Spread Function, PSF）对应的 Toeplitz 矩阵， ϵ 为噪声项。QDPC 系统的相位传递函数（PTF）本质上是一个边缘检测滤波器，这一固有特性为后续引入稀疏先验提供了理论依据。

（二）暗场图像与稀疏性特征

在光学成像中，“暗场”通常指仅收集样本散射光的成像模式。而在 QDPC 成像中，暗场稀疏先验基于一个关键观察：在理想情况下，差分相衬图像的大部分像素值应为零。这是因为反非对称照明下两幅图像的相减操作会抵消所有背景成分，仅保留与样本结构相关的边缘信息^[2]。这一特性意味着理想的差分相衬图像具有天然的稀疏性——图像中仅有少量像素对应样本边界，其余背景区域像素值为零。然而，实际采集的图像受到噪声、背景波动和非理想光学条件的影响，这种稀疏性被破坏，导致后续相位重建质量下降。

二、暗场稀疏先验的数学实现

（一）融合 DSP 的代价函数

为了在相位重建过程中恢复暗场图像应有的稀疏性，Zhang 等人^[4]提出在优化目标中引入暗场稀疏先验项。传统的 QDPC 相位重建问题可表述为：

$$\Phi = \underset{\Phi}{\operatorname{argmin}} \{F(S, \Phi) + \alpha R(\Phi)\} \quad (3)$$

其中 F 为数据项（采用 L2 范数衡量测量值与预测值之差）， R 为正则项， α 为惩罚参数。

DSP 方法将暗场图像的稀疏性作为先验知识，构建新的代价函数：

$$\Phi = \underset{\Phi}{\operatorname{argmin}} \Phi S - H \Phi^2 + \lambda S_{dark0} \quad (4)$$

其中 S_{dark0} 表示暗场图像，L0 范数直接统计非零像素个数，强制暗场图像中大部分像素值为零。

（二）L0 范数优化求解

L0 范数优化属于 NP 难问题，无法直接求解。为此，Fan 等人^[5]发展了两种求解策略：

（1）半二次分裂法（Half Quadratic Splitting）：引入辅助变量将原问题分解为两个子问题交替优化，一个子问题在图像域

求解，另一个在变换域求解。

（2）Richardson-Lucy 反卷积：将 DSP 先验与经典的 Richardson-Lucy 迭代算法结合，在保持非负约束的同时促进稀疏性。

三、实验验证与性能评估

（一）成像系统配置

实验采用标准 QDPC 4-f 光学成像系统。系统前端通过可编程 LED 阵列产生非对称照明模式，沿水平方向依次采集左斜入射照明下的强度图像 I_{left} 和右斜入射照明下的强度图像 I_{right} ，进而计算差分相衬图像 S 。系统后端的 CMOS 相机以 12 位灰度模式记录原始强度图像，图像分辨率统一设定为 512×512 像素。

（二）模拟数据验证

首先在仿真数据上验证 DSP 方法的有效性，本文通过生成已知相位分布的模拟样本，分别采用传统 L_2 -QDPC、TV-QDPC 和 DSP-QDPC 进行重建，以峰值信噪比（PSNR）和结构相似性（SSIM）作为评价指标。

结果显示，DSP 方法在低信噪比条件下仍能保持较高的重建精度，有效抑制了传统方法中常见的振铃伪影和“白雾”效应。采用 L0 范数优化的 DSP 方法相较于传统的 L2 范数和全变分正则化方法，在相位重建质量和计算效率上均有显著提升。在低信噪比条件下，DSP 方法的重建结果峰值信噪比（PSNR）提升约 3~5 dB，结构相似性（SSIM）提高 0.11，同时单次重建耗时减少约 21%。

（三）实验数据验证

为进一步验证方法在实际系统上的性能，采集了不同类型生物样本（植物根组织、动物血液涂片）的 QDPC 图像。实验结果表明：DSP 方法能够有效去除相机噪声，同时保留样本的细微结构信息；在背景去除效果方面，自动消除由于样本浮动或系统不理想导致的背景波动；可对图像边缘进行增强，利用暗场图像的边缘稀疏特性，重建相位中样本边界更加清晰。

四、在缺陷检测中的应用潜力

（一）传统缺陷检测方法的局限

在工业检测领域，透明材料（如光学薄膜、玻璃基板、生物芯片）的缺陷检测是一项重要任务。传统方法包括暗场显微成像（直接观察散射信号）和干涉相位成像（定量测量光程差）。暗场成像虽能快速定位缺陷，但难以获取缺陷的定量信息（如深度、厚度）；干涉方法虽能定量测量，但系统复杂、对振动敏感。

（二）DSP-QDPC 的优势

结合 DSP 的 QDPC 技术为缺陷检测提供了新思路：

（1）无需标记的定量测量：直接获取缺陷区域的定量相位信息，反映缺陷的几何厚度或折射率变化；

（2）系统鲁棒性强：通过算法层面的稀疏先验，降低对硬件精密度的依赖，适合工业现场应用；

(3) 边缘敏感性: 暗场稀疏先验天然增强样本边缘, 对于划痕、微粒等边界清晰的缺陷具有更高检测灵敏度;

(4) 无需修改光学系统: DSP 方法可直接嵌入现有 QDPC 系统的图像处理流程, 无需硬件改动, 便于技术迁移。

(三) 潜在应用场景

基于暗场稀疏先验的 QDPC 技术可在多种无标记检测场景中发挥独特优势: 在光学元件表面质量检测中, 它能够定量测量划痕深度与微粒高度; 在透明薄膜均匀性评估中, 可有效检测厚度起伏和气泡缺陷; 对于微流控芯片的结构验证, 该技术可清晰评估通道形貌及堵塞情况; 此外, 在生物样本污染检测方面, 还能准确识别无标记样本中的异物颗粒。

五、结论与展望

暗场稀疏先验为 QDPC 相位重建提供了一种简洁而高效的优

化框架。通过利用暗场图像天然的稀疏特性, 构建 L0 范数正则化代价函数, DSP 方法在保持数据保真度的同时, 显著提升了相位重建的鲁棒性和质量, 且无需对光学系统进行任何修改。该框架克服了传统 L2 范数正则化易产生的背景“白雾”伪影以及全变分正则化过度平滑边缘的缺陷, 使得在低信噪比条件下仍能获得高保真度的相位恢复结果。

未来研究方向可从以下方面展开: 一是深度学习融合, 将暗场稀疏先验与深度神经网络结合, 探索端到端的相位重建模型; 二是动态过程监测, 拓展 DSP 方法至时序相位重建, 实现对活细胞动态过程或快速运动缺陷的实时检测。随着计算光学成像技术的不断发展, 基于暗场稀疏先验的 QDPC 方法有望在生物医学研究和工业缺陷检测领域发挥更大作用。

参考文献

[1]Shao M. Dark-field Sparse Prior for Quantitative DPC Imaging. SPIE Digital Library, 2020.
[2]Zhang S, Peng T, Ke Z, et al. High-fidelity quantitative differential phase contrast deconvolution using dark-field sparse prior. In the processing of the Sixteenth International Conference on Photonics and Imaging in Biology and Medicine (PIBM 2023). SPIE, 234-242(12745), 2023.
[3]Peng T, Ke Z, Zhang S, et al. Quantitative differential phase contrast phase reconstruction for sparse samples. Optics and Lasers in Engineering, 74-78(163), 2023.
[4]Zhang S, Wu H, Peng T, et al. Pupil-driven quantitative differential phase contrast imaging. arXiv preprint, 2306-2310, 2023.
[5]Fan Y, Sun J, Chen Q, et al. Optimal illumination scheme for isotropic quantitative differential phase contrast microscopy. Photonics Research, 890-905(8), 2019.