

基于迭代的纯相位全息图生成算法比较研究

王晓诗, 桂进斌*, 李俊昌, 宋庆和

昆明理工大学理学院物理系, 云南 昆明 650500

摘要 纯相位全息图因无共轭像、衍射效率高,在全息三维显示中得到广泛应用。迭代算法因计算灵活、编码图像重建质量高,在纯相位全息图生成中具有重要地位。对基于迭代的生成纯相位全息图最新算法进行比较研究,介绍迭代算法生成纯相位全息图的基本原理,编程实现了典型代表性、创新性算法。通过图像重建质量、耗时长短的对比,进行了详细的实验研究,分析了各类方法的特点和优缺点。结论表明,对于较大像素差的图像,选用直方图补偿算法可得较好的效果,对于高重建质量的图像,可选用自适应加权 Gerchberg-Saxton 算法。

关键词 计算全息; 纯相位全息图; 迭代算法; 相位恢复; 图像重建

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213197

Comparative Study of Phase-Only Hologram Generation Algorithms Based on Iteration

Wang Xiaoshi, Gui Jinbin*, Li Junchang, Song Qinghe

Department of Physics, Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, Yunnan, China

Abstract Phase-only holograms are used widely in holographic three-dimensional display owing to their high diffraction efficiency and no conjugate image. An iterative algorithm plays an important role in generating phase-only holograms because of its flexible calculation and high-quality image reconstruction. This study introduced a comparative study on the latest iterative algorithms for generating phase-only holograms. The basic principle of generating phase-only holograms by iterative algorithm was introduced, and representative and innovative algorithms were realized by programming. Experiments were performed to analyze the characteristics, advantages, and disadvantages of various methods by comparing the image reconstruction quality and computation time. The results show that the histogram compensation algorithm can obtain better results for images with large pixel differences, the adaptive weighted Gerchberg-Saxton algorithm can be used for images with high reconstruction quality.

Key words computer-generated holography; phase-only hologram; iterative algorithm; phase retrieval; image reconstruction

1 引言

全息三维显示技术能够再现三维物体波前分布的全部信息,被认为是最具发展前景的真三维显示技术^[1-9]。1948年,丹尼斯·盖伯提出一种记录光波振幅和相位的方法,随后用实验证实这一想法,做出了世界上第一张全息图,从此诞生了全息技术。在过去的六十年中,由于科技的快速发展以及科学家的探索,全息技术从传统的激光全息发展到了如今的计算全

息^[10-15],但全息图的动态显示仍是全息技术发展到目前的瓶颈之一。目前用于全息显示的主要光学器件——空间光调制器(SLM),可分为振幅型空间光调制器和相位型空间光调制器。其中硅基液晶作为相位型空间光调制器因更高的衍射效率而得到广泛应用^[16-17]。单一的SLM由于仅能选择性地对振幅或相位进行调制而无法实现复全息图的显示,双SLM在光路实现上又存在困难。因此将复全息图转换为纯振幅型或者纯相位型全息图是如今全息领域的研究热点。

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2022-01-13; 录用日期: 2022-01-21; 网络首发日期: 2022-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(62065010,62165007,61565011)

通信作者: jinbingui@163.com

其中纯相位全息图因无共轭像、衍射效率高受到高度关注并得到广泛应用^[18-23]。纯相位全息图的生成主要可分为两类优化方法,即非迭代方法^[24-30]和迭代方法。非迭代法具有计算量少的优点,但由于缺乏针对不同目标图像的进一步优化,容易影响算法的稳定性。迭代算法可根据特定的目标图像搜索以及纯相位全息图的相位轮廓优化,有效提高重建图像质量,被广泛应用于纯相位全息图的优化中。迭代算法主要是基于 Gerchberg-Saxton(GS)算法进行研究改进的,主要的研究方向在于振幅约束条件改进、初始相位设定及图像感知质量评估这几方面。迭代傅里叶变换算法^[31]包括 GS 算法^[32]、Fienup 算法^[33-35]和 Fidoc 算法^[36-37],能够通过快速傅里叶变换(FFT)显著加速计算。Gerchberg 和 Saxton 提出了一种在目标图像和重建图像之间来回迭代来更新约束减小误差的 GS 算法,GS 迭代算法是相位恢复数值领域的经典算法,建立了相位恢复的衍射迭代基本形式^[38]。Fienup 算法通过在迭代中引入目标图像和重建图像之间的差异来提升收敛速度。Fidoc 算法在 Fienup 算法的基础上添加了“非关心区域”加以收敛系数作为改进。曹良才课题组^[39-40]提出了一种加权约束迭代算法,该算法将图像划分为两个区域,在迭代过程中实施不同的约束策略来计算生成纯相位全息图。Wu 等^[41]提出了一种自适应加权 GS 算法,通过设计的反馈代替传统加权 GS 算法中的反馈,进而提高迭代的收敛性。韩国光子学技术研究所空间光学信息研究中心的 Kim 等^[42]在 2020 年提出的算法中引入了直方图补偿,从根本上减小重建图像过程中出现的误差,通过补偿再现过程中极端强度的损失来提高重建图像质量。

如上文所述,近年来基于迭代的纯相位全息图生成算法的研究已经取得了一定的成果。本文将先介绍迭代算法的基本原理与迭代流程,再对迭代算法所面临的优化问题及其解决方案,包括重建质量的优化、算法收敛速度的提高、重建图像的噪声抑制等方面,进行总结与讨论。

2 GS 算法

GS 算法是一种迭代算法,主要原理是利用相位来补偿复振幅光场,通过传播函数(如傅里叶变换)在目标图像平面以及全息图像平面上的光场分布下进行迭代循环计算。GS 算法主要通过给不同阶段的复振幅加上各自的约束条件,经过反复迭代后求出所需要的相位全息图^[43]。GS 迭代算法的流程如图 1 所示。

首先,使用目标图像的初始振幅分布 A_0 作为重构光场的振幅分布 $A(x, y)$,并产生一个与目标图像同样大小的随机相位矩阵作为初始相位,生成初始光场分布 $A_0 \exp(j\varphi_0)$ 。初始光场经傅里叶变换至频谱域,得输出平面上的光场分布为 $A_1 \exp(j\theta)$ 。根据约束条件

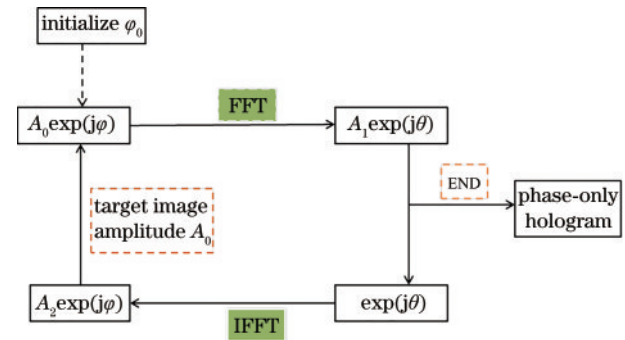


图 1 GS 迭代算法的流程

Fig. 1 Flowchart of the GS iterative algorithm

对输出平面上的光场分布修正频谱。由于约束条件的模必须是均匀的,故设频谱的模为单位 1,相位不变,得到新的光场分布 $\exp(j\theta)$ 。对经过频域约束条件修正后的光场分布进行快速傅里叶逆变换(IFTT),得到输入平面的光场分布 $A_2 \exp(j\varphi)$ 。对新得到的输入平面的光场分布施加空域振幅约束条件,用目标图像的初始振幅分布 A_0 代替 A_2 ,同时保持相位不变,从而获得新的光场分布。得到的光场被看作是下次迭代中的初始光场。重复迭代过程,直至达到所需目标(如一定迭代次数)。

3 迭代算法的改进研究进展

面对追求更高效率、更高重建质量的纯相位全息图,关于迭代算法需要研究的内容还有很多。需要从抑制散斑噪声和提高重建图像质量两方面共同优化迭代算法:为抑制散斑噪声和光学伪影^[41,44-46],迭代算法的主要改进方向为设定初始相位,设定的相位主要有随机相位、带限初始相位、二次相位、近似二次相位等;为提高重建图像质量和收敛速度^[39-42],需要不断完善振幅约束条件,近年来提出了加权约束迭代算法、自适应加权 GS 算法、直方图补偿算法等。本文也将按照两个优化途径进行介绍,先介绍近几年来改进初始相位条件的研究进展,再重点介绍近年来基于振幅约束条件优化途径的改进情况,详细介绍了各个算法的基本原理,编程实现了典型代表性、创新性算法,分析了各类方法的特点和优缺点。

3.1 基于初始相位的改进算法

为了改善重建图像中的散斑噪声、图像边缘模糊等问题,迭代算法中的初始相位作为研究热点而被提出。在迭代算法的过程中,通常使用随机相位与目标图像的初始振幅分布生成光场分布,以避免纯相位全息图的重建图像中只保留边缘的图像的严重退化问题。Chen 等^[45]为了避免随机初始相位引起的停滞问题,提出了一种带限初始相位,保证再现光场的带限约束,将整个信号能量尽可能均匀地分布到全息图区域。Pang 等^[46]将二次相位 $\varphi(m, n) = ax^2 + by^2$ 加到目标

图像上,根据透镜的成像关系和简单的几何关系确定二次相位的相关参数,进而达到平滑物体的频谱、消除采样点之间的破坏性干扰、显著改善散斑噪声的目的。虽然在抑制散斑噪声方面二次相位优于随机相位,但重建图像中会出现光学伪影。于是 Wu 等^[41]提出了一种近似相位,使用一组具有离散方向的平面波来表示近似二次相位,能够有效地抑制背景噪声和伪影。

3.2 基于振幅约束的改进算法

在迭代算法中,初始相位影响着重建图像中的噪声问题,而算法中的振幅约束条件则对重建图像的质量和运行速度起关键作用,是整个算法的核心。近年来的纯相位全息图生成的迭代算法大多数都是基于改进算法循环中的振幅约束条件提出的。

3.2.1 Fienup 算法

Fienup^[33]基于 GS 算法提出了一种输入-输出算法,通过调整输入面的限制条件和输出面的限制条件增加了反馈过程,改善图像重建质量。与 GS 算法不同之处是,在空域振幅约束条件中,Fienup 算法使用 A_3 代替了 A_2 ,同时保持相位不变。

$$A_3 = A_0 + c(A_0 - A_2), \quad (1)$$

式中: c 为反馈系数,可根据不同的全息图调整为合适的大小。

杨振亚等^[38]提出了一种基于 HIO 算法的压缩传感的相位恢复算法,该算法可在少量采样的情况下依然精确重建物面复振幅分布。潘兴臣等^[34]则提出了一种基于 Fienup 算法的迭代重建算法,来解决数字全息的再现像的分离问题。Mukherjee 等^[35]基于 Fienup 算法加强稀疏性,并连续改进相位估计,解决了稀疏相位恢复的问题。

3.2.2 加权约束迭代算法

曹良才课题组^[39]基于 Fidoc 算法中噪声抑制参数需要手动选择这一问题,在近年提出了加权约束迭代算法。该算法将图像平面划分为信号区域和非信号区域,使用可随迭代进度变化的自适应参数约束信号区域的幅度分布,而在非信号区域,则基于能量守恒原理通过全息平面中的总能量控制来间接约束。在迭代过程中,图像平面中下一次迭代的空域振幅约束条件为

$$A_3 = \begin{cases} |A_k| (A_0 / |A'_k|)^{\beta_k}, & \text{target area} \\ |A'_k|, & \text{non-target area} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\beta_k = \sqrt{\beta_{k-1}}, \quad (3)$$

式中: k 为迭代次数; $|A_k|$ 是第 k 次迭代后输入的振幅分布; $|A'_k|$ 是第 k 次迭代后重建图像的振幅分布; β_k 为自适应参数,增强迭代算法的收敛性。

在非信号区域,因为利用能量守恒原理通过控制全息平面的总能量间接地约束了像平面的总能量,从而达到抑制非信号区域的噪声的目的。

3.2.3 自适应加权 GS 算法

为了解决反馈不稳定导致算法发散的问题,Wu 等^[41]提出了一种自适应加权 GS 算法,用设计的反馈代替传统的反馈,构造一个指数项来形成反馈,保证了该方法的收敛性。反馈系数 W_{pro} 定义为

$$W_{\text{pro}} = \exp^{A_0 - A_2}. \quad (4)$$

随着迭代次数的增加, A_2 近似等于 A_0 ,反馈值收敛到稳定值 1。在迭代过程中,全息平面中非信号区域的空域振幅约束条件为单位幅度,目标区域中的空域振幅约束条件表示为

$$A_3 = \begin{cases} A_0 \cdot W_{\text{pro}}, & \text{target area} \\ A_2, & \text{non-target area} \end{cases}. \quad (5)$$

3.2.4 直方图补偿算法

Kim 等^[42]在近年来提出了一种新思路,在空域约束条件中引入了一种直方图补偿方法,从根本上减小纯相位全息图在重建图像过程中出现的误差,通过补偿重建过程中极端强度的损失来提高迭代速度。把前几次迭代次数作为预选代,并采用直方图代替传统的目标图像振幅强度进行空域约束,空域振幅约束条件为

$$P_{\text{new}} = \begin{cases} 0, & P_{\text{old}} < K_{\text{low}} \\ (P_{\text{old}} - K_{\text{low}}) / (K_{\text{high}} - K_{\text{low}}), & K_{\text{low}} < P_{\text{old}} < K_{\text{high}} \\ 1, & P_{\text{old}} > K_{\text{high}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: P_{new} 和 P_{old} 为输入图像和输出图像的像素强度值; K_{low} 和 K_{high} 为低区域和高区域的直方图补偿参数。Kim 等^[42]亦通过实验证明了最优的预选代次数为总迭代次数的 25%,最优直方图补偿量为输入图像像素区域下方 25% 和像素区域上方 15%。在随后的迭代中,采用 GS 算法进行迭代,使用在预选代中获得的对象区域的相位作为初始值。

4 实验比较验证

为了验证所提方法的可行性,对所列举的前沿最新算法进行模拟仿真实验。选用 15 张不同的图像进行迭代计算,设定迭代次数为 30,使用型号为 Win10 的系统进行模拟实验。

4.1 实验模拟结果

各算法处理 15 张图像后得到的峰值信噪比 (PSNR) 和计算时间如表 1 所示。

为了更直观地看出各种算法的差异,图 2 和图 3 给出了模拟实验中各算法对 mola 和 peppers 这两幅图像重建的图像。图 4 给出重建图像的 PSNR 曲线。各个算法的性能对比结果如表 2 所示。

4.2 实验分析

GS 算法计算简单,所用时间较少,在迭代次数增加的情况下有效收敛且具有不增加误差的特性。但 GS 算法对图像平面中的所有采样点赋予相同的权重,

表 1 各算法的模拟实验数据
Table 1 Simulation experimental data of each algorithm

Experimental image	GS algorithm		Fienup algorithm		Weighted constraint iterative algorithm		Adaptive weighted GS algorithm		Histogram compensation algorithm	
	PSNR / dB	Computing time / s	PSNR / dB	Computing time / s	PSNR / dB	Computing time / s	PSNR / dB	Computing time / s	PSNR / dB	Computing time / s
creamman	25.68	1.66	28.72	1.85	25.25	1.73	27.06	1.95	26.29	1.77
baboon	27.34	1.42	31.76	1.43	27.46	1.88	29.06	1.84	28.42	1.51
Lina	27.27	2.95	30.49	2.69	31.55	4.25	35.05	3.61	28.43	2.90
mola	25.48	2.99	28.29	2.77	30.55	4.21	33.33	3.80	26.57	2.92
peppers	29.77	2.65	33.15	2.89	33.85	3.31	34.31	3.51	31.12	2.52
autumn	21.65	1.46	22.94	1.61	23.49	2.01	23.85	2.04	21.87	1.54
coins	28.16	1.34	31.39	1.37	31.06	1.98	31.29	1.74	30.59	1.31
lighthouse	25.97	3.37	29.29	3.46	30.46	4.79	35.24	4.62	26.97	3.32
moon	19.18	2.57	19.71	2.41	22.42	3.49	22.95	3.02	19.18	2.92
pears	27.48	3.90	31.38	4.19	32.62	5.19	35.39	4.76	28.22	3.92
rice	26.89	1.55	30.62	1.55	27.51	1.90	30.07	2.01	29.09	1.68
trailer	22.26	6.49	23.17	6.31	23.37	9.46	23.75	8.67	22.25	6.81
liftingbody	28.55	2.74	32.76	2.78	33.28	4.16	38.63	3.64	28.99	3.38
horse	19.02	2.95	19.00	3.00	20.83	4.01	21.65	3.78	19.04	3.07
opera	22.83	3.01	23.56	3.02	25.47	3.92	27.03	3.75	22.70	2.98

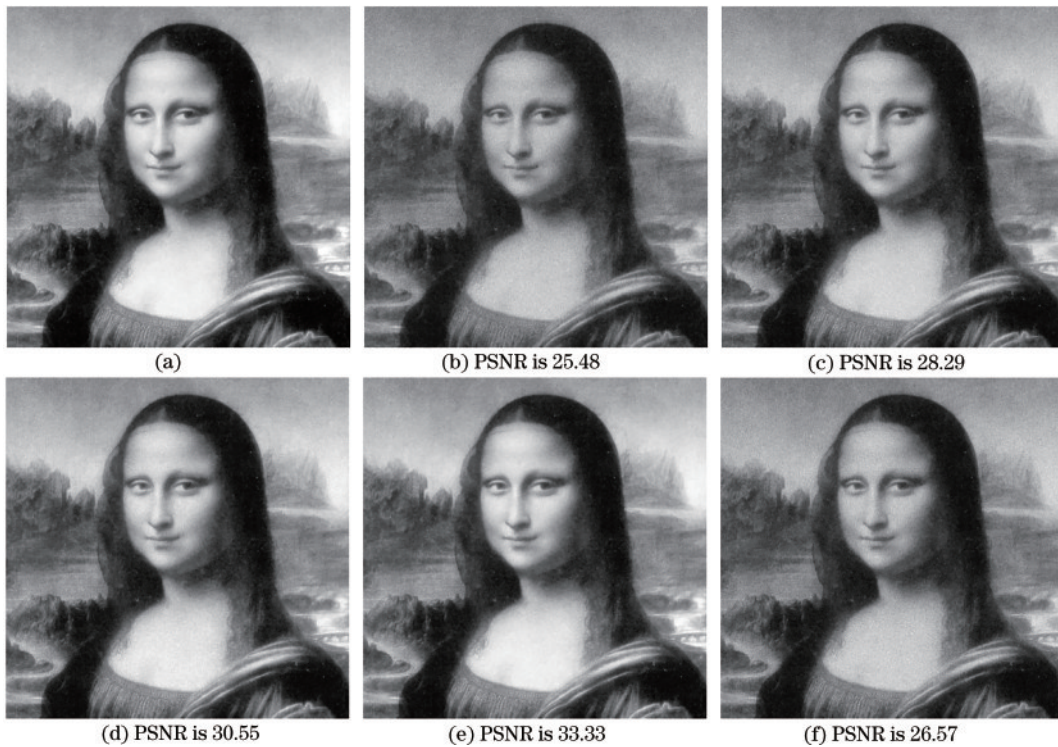


图 2 各算法对 mola 图像的仿真重建图像。(a)原始图像;(b) GS 算法;(c) Fienup 算法;(d) 加权约束迭代算法;(e) 自适应加权 GS 算法;(f) 直方图补偿算法

Fig. 2 Simulated reconstructed images of each algorithm for mola image. (a) Original image; (b) GS algorithm; (c) Fienup algorithm; (d) weighted constraint iterative algorithm; (e) adaptive weighted GS algorithm; (f) histogram compensation algorithm

导致初始的迭代过程中显著减小误差值,而后续的迭代过程不能使误差值趋于稳定。这也从侧面证明了 GS 算法往往有停滞在局部最小值的问题。

Fienup 算法的 PSNR 比 GS 算法平均提高了 2.62 dB 且加快了收敛速度。但对于反馈系数 c , 需根据不同的图像手动测试并从中选择最优值,且随着迭

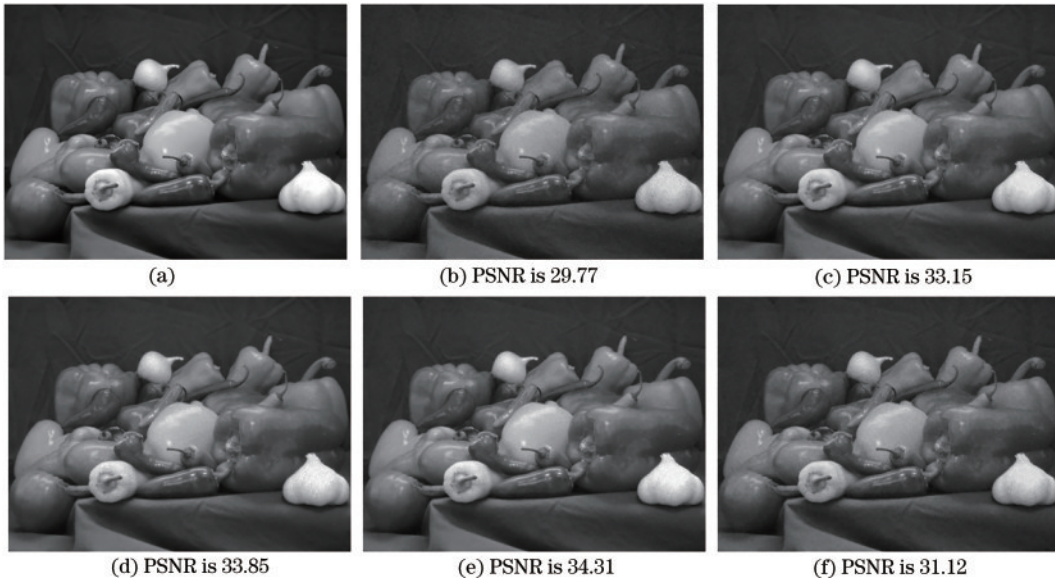


图 3 各算法对 peppers 图像的仿真重建图像。(a)原始图像;(b) GS 算法;(c) Fienup 算法;(d)加约束迭代算法;(e)自适应加权 GS 算法;(f)直方图补偿算法

Fig. 3 Simulated reconstructed images of each algorithm for peppers image. (a) Original image; (b) GS algorithm; (c) Fienup algorithm; (d) weighted constraint iterative algorithm; (e) adaptive weighted GS algorithm; (f) histogram compensation algorithm

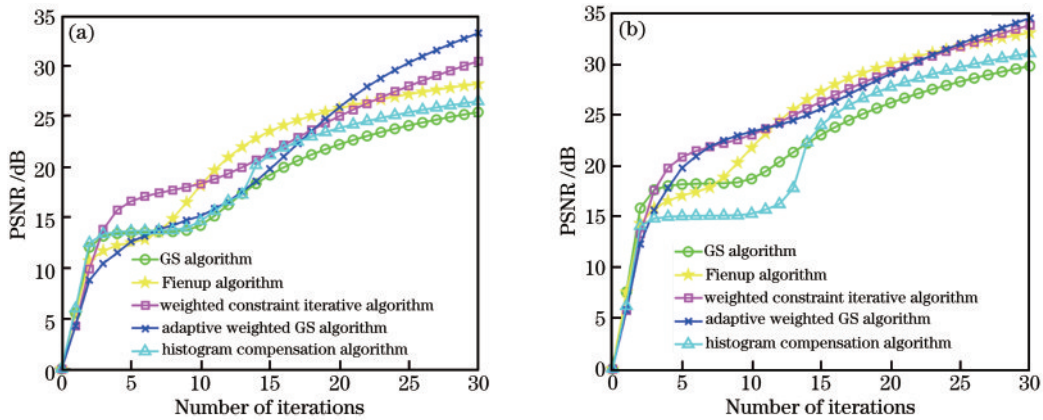


图 4 不同算法的图像重建结果的 PSNR。(a)mola 图像;(b) peppers 图像

Fig. 4 PSNR of the image reconstruction results of the different algorithms. (a) mola image; (b) peppers image

表 2 各算法模拟的性能对比

Table 2 Performance comparison of each algorithm simulation

Performance	GS algorithm	Fienup algorithm	Weighted constraint iterative algorithm	Adaptive weighted GS algorithm	Histogram compensation algorithm
Computing time	Least	Less	Most	More	Less
Rate of convergence	Slowest	Slower	Faster	Fastest	Faster
Reconstruction quality	General	General	Good	Best	General

代次数的增加,重建质量的改善效果逐渐趋于平缓。对于计算资源不多且重建质量要求不高的情况,可采用 Fienup 算法生成纯相位全息图。

加约束迭代算法引入能量守恒定理,间接约束非信号区域,提供了更大的优化空间,同时保持了图像平面内整体有效的约束。而相比以往算法需人为选择噪声抑制参数,该算法引入可随迭代进度变化的自适

应参数作为信号区域的约束条件,免去了手动选择参数的麻烦,PSNR 比 GS 算法提高了 2.78 dB,但所需的计算资源和时间较多。该算法重建图像质量较好且适用性较广,适用于大多数图像,但编码实现较为复杂。

自适应加权 GS 算法从算法的收敛性方向加以改善,提出了一种新的指数反馈机制作为约束条件,保证算法的收敛性,所需的计算资源和计算时间虽比传统

的 GS 迭代算法要多一些,但重建图像质量获得了较大提升,PSNR 提高了 4.74 dB,追求高质量的重建图像可选择该算法。

直方图补偿算法开拓了新的研究思路,使用直方图补偿了传统 GS 算法上极端像素的损失,与 GS 方法相比,该算法的 PSNR 提高了 0.81 dB,达到相同图像质量的迭代次数减少了 23%。直方图补偿算法几乎不增加计算量,建议与现有的反馈方法同时使用。由直方图补偿算法对 mola 图像和 peppers 图像处理得到的 PSNR 曲线可看出,对于像素相差较大的图像,该算法补偿效果更好。对于一些灰度值像素跨度较大的图像,使用该算法与其他反馈机制相结合,可得到生成纯相位全息图较好的重建效果。

5 讨 论

误差扩散概念最初在 1976 年被提出,后来被 Hauck 等^[47]用于计算全息图的生成中。不同于上述在目标图像平面和全息图像平面间进行迭代生成纯相位全息图的算法,误差扩散算法为了补偿去除振幅信息后每个全息图像素存在的误差,在全息图平面的各个像素之间进行依次迭代^[48-53],被称为一步相位恢复过程。最新研究中,曹良才课题组^[53]提出了一种模式自适应双向误差扩散算法,该算法根据不同的目标图像修改像素幅度,有效地消除了编码噪声,提高了重建质量。以上所讨论的改进算法主要都是为了解决重建图像中所存在的问题和提高重建图像的质量,但在迭代算法中的收敛速度方面仍存在可改进之处,于是图像质量评估这一概念被提出。图像质量评估是迭代傅里叶变换算法计算生成纯相位全息图的关键环节之一,主要用于加快约束迭代算法。其中迭代算法终止的指标是预定义的图像质量评估度量需求得到满足或迭代的数量达到预定义的阈值^[54-60]。

5.1 图像质量评估

目前在纯相位全息图生成的迭代算法中,图像质量评估度量主要是均方根误差(RMSE)和结构相似性(SSIM)这两种。RMSE 是迭代算法中最广泛使用的图像质量度量,值越小表示重建图像的质量越好。但 RMSE 对图像内容很敏感,不能准确反映感知到的图像质量。Yang 等^[59]首次提出将 SSIM 作为图像质量度量的概念,SSIM 作为迭代算法中的感知图像质量评估度量能够更好预测图像存在的噪声,当进一步的迭代不再使重建图像质量得到改善时将算法终止。使用 SSIM 作为图像质量评估度量,多达 75% 的不必要迭代次数被消除。

5.2 分析

本文阐述了现有的生成纯相位全息图的迭代算法,并对其中具有代表性、创新性的几个主要算法进行了对比研究,分析了它们各自的优劣之处。对算法的初始相位进行改进也是近年来的研究热点。其中近似

二次相位对抑制散斑噪声和光学伪影的效果最佳。利用迭代算法中的振幅约束条件,通过寻找目标图像平面与全息图像平面的振幅强度的不同关联来提高重建图像质量和收敛速度。自适应加权 GS 算法重建质量较高,所需计算资源也不多;而直方图补偿算法虽然开拓了新思路,引入了直方图作为振幅约束条件,但重建质量提升不大,适合像素相差较大的图像。图像质量评估是迭代算法提高计算收敛速度的关键。使用最多的是 RMSE 图像质量度量,但由于其对图像内容太过于敏感不能准确地反映图像质量,SSIM 作为一种新的图像质量度量被提出。近年来,迭代算法虽然在纯相位全息图的生成上取得了不少成果,但在噪声抑制和收敛反馈上仍有许多可提升的空间。此外,对于迭代算法中计算量较大的问题,很多学者提出了一些基于复调幅和光学滤波的生成纯相位全息图的非迭代方法。近年来,热门的深度学习相关算法已经开始用于全息图领域,这也能为纯相位全息图的生成提供新的研究思路。

6 结 论

对纯相位全息图生成的主要方法——迭代算法的最新发展进行了详细介绍并比较了算法的优劣。由于国内在纯相位全息图领域的研究已得到了一些成果,因此在之后的研究中应更注重细节和算法相关系数的最优化。同时,结合深度学习神经网络进行计算的纯相位全息图生成算法已经作为一种新的研究方向出现,今后国内在网络算法的升级、重建质量的进一步优化、新型立体实时全息图像的生成等领域的研究将是新的内容。

参 考 文 献

- [1] Benton S A, Bove V M, Jr. Holographic imaging[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [2] Chang C L, Xia J, Yang L, et al. Speckle-suppressed phase-only holographic three-dimensional display based on double-constraint Gerchberg-Saxton algorithm[J]. Applied Optics, 2015, 54(23): 6994-7001.
- [3] Pan Y J, Liu J, Li X, et al. A review of dynamic holographic three-dimensional display: algorithms, devices, and systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(4): 1599-1610.
- [4] 张亚凤, 刘翠响, 马杰, 等. 基于多特征点匹配的三维人体姿态重建[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 1615003.
Zhang Y F, Liu C X, Ma J, et al. 3D human pose reconstruction based on multi-feature point matching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1615003.
- [5] 向东. 三维物体的计算全息图快速生成算法及显示研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017: 15-20.
Xiang D. The research of fast algorithm and display of computer-generated hologram for three dimension objects [D]. Kunming: Kunming University of Science and

- Technology, 2017: 15-20.
- [6] 姜智翔, 桂进斌, 王国庆, 等. 用于三维显示的全息压缩技术概述[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240001.
Jiang Z X, Gui J B, Wang G Q, et al. Overview of holographic-compression technology for three-dimensional display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240001.
- [7] Pang H, Wang J Z, Cao A X, et al. High-accuracy method for holographic image projection with suppressed speckle noise[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22766-22776.
- [8] Tsang P W M, Poon T C. Review on the state-of-the-art technologies for acquisition and display of digital holograms[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(3): 886-901.
- [9] Zhai T T, Song Q, Liao E L, et al. An approach for holographic projection with higher image quality and fast convergence rate[J]. Optik, 2018, 159: 211-221.
- [10] Nishitsuji T, Shimobaba T, Kakue T, et al. Review of fast calculation techniques for computer-generated holograms with the point-light-source-based model[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2447-2454.
- [11] Blinder D, Schelkens P. Phase added sub-stereograms for accelerating computer generated holography[J]. Optics Express, 2020, 28(11): 16924-16934.
- [12] Leonardo R D, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1913-1922.
- [13] 杨建宇, 董浩, 邢福临, 等. 单分子定位超分辨成像技术进展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 1200001.
Yang J Y, Dong H, Xing F L, et al. Single-molecule localization super-resolution microscopy and its applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(12): 1200001.
- [14] Guan C S, Wang Z C, Ding X M, et al. Coding Huygens' metasurface for enhanced quality holographic imaging[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7108-7119.
- [15] Wang Z, Zhu L M, Zhang X, et al. Computer-generated photorealistic hologram using ray-wavefront conversion based on the additive compressive light field approach[J]. Optics Letters, 2020, 45(3): 615-618.
- [16] Michalkiewicz A, Kujawinska M, Krezel J, et al. Phase manipulation and optoelectronic reconstruction of digital holograms by means of LCOS spatial light modulator[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5776: 144-152.
- [17] 桂进斌, 张凯, 李俊昌, 等. 复振幅调制相息图编码及滤波系统的优化设计[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1509001.
Gui J B, Zhang K, Li J C, et al. Optimal design of kinoform encoding and filtering system based on complex amplitude modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1509001.
- [18] Zhang Z C, You Z, Chu D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e213.
- [19] Zeng W M, Poon C T, Wang M, et al. Integrating multiple images in a sampled phase-only hologram[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(5): 050901.
- [20] 刘凯峰, 沈川, 张成, 等. 纯相位菲涅尔全息图的反馈迭代算法及其硅基液晶显示[J]. 光子学报, 2014, 43(5): 0509003.
Liu K F, Shen C, Zhang C, et al. Iterative feedback algorithm for phase-only Fresnel hologram and display using liquid crystal on silicon[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 0509003.
- [21] Lazarev G, Chen P J, Strauss J, et al. Beyond the display: phase-only liquid crystal on silicon devices and their applications in photonics[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 16206-16249.
- [22] Li B Y, Wang J, Chen C, et al. Spherical self-diffraction for speckle suppression of a spherical phase-only hologram [J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31373-31385.
- [23] 卜浩祯, 焦述铭. 纯相位全息图优化算法[J]. 液晶与显示, 2021, 36(6): 810-826.
Bu H Z, Jiao S M. Review of computer-generated phase-only hologram optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(6): 810-826.
- [24] Mendoza-Yero O, Mínguez-Vega G, Lancis J. Encoding complex fields by using a phase-only optical element[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1740-1743.
- [25] Qi Y J, Chang C L, Xia J. Speckleless holographic display by complex modulation based on double-phase method[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 30368-30378.
- [26] Zhao T, Liu J, Duan J Y, et al. Image quality enhancement via gradient-limited random phase addition in holographic display[J]. Optics Communications, 2019, 442: 84-89.
- [27] Chen L Z, Zhang H, Cao L C, et al. Non-iterative phase hologram generation with optimized phase modulation[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 11380-11392.
- [28] Tsang P W M, Chow Y T, Poon T C. Enhancement on the generation of sampled phase-only holograms[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(6): 060901.
- [29] Tsang P W M, Chow Y T, Poon T C. Generation of edge-preserved noise-added phase-only hologram[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(10): 100901.
- [30] Tsang P W M, Chow Y T, Poon T C. Generation of patterned-phase-only holograms (PPOHs) [J]. Optics Express, 2017, 25(8): 9088-9093.
- [31] Wyrowski F, Bryngdahl O. Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1988, 5(7): 1058-1065.
- [32] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of plane from image and diffraction pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-250.
- [33] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [34] 潘兴臣, 刘诚, 朱健强. 用改进的 Fienup 迭代算法进行数字全息重建[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0609002.
Pan X C, Liu C, Zhu J Q. Improved Fienup's iteration method for image reconstruction in digital holography[J].

- Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0609002.
- [35] Mukherjee S, Seelamantula C S. Fienup algorithm with sparsity constraints: application to frequency-domain optical-coherence tomography[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(18): 4659-4672.
- [36] Akahori H. Spectrum leveling by an iterative algorithm with a dummy area for synthesizing the kinoform[J]. Applied Optics, 1986, 25(5): 802-811.
- [37] Wyrowski F. Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blazed phase structures[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1990, 7(6): 961-969.
- [38] 杨振亚, 郑楚君. 基于压缩传感的纯相位物体相位恢复[J]. 物理学报, 2013, 62(10): 104203.
Yang Z Y, Zheng C J. Phase retrieval of pure phase object based on compressed sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(10): 104203.
- [39] Chen L Z, Zhang H, He Z H, et al. Weighted constraint iterative algorithm for phase hologram generation[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3652.
- [40] Chen L Z, Zhang H, Cao L C, et al. Weighted iterative algorithm for phase hologram generation with high-quality reconstruction[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11188: 347-351.
- [41] Wu Y, Wang J, Chen C, et al. Adaptive weighted Gerchberg-Saxton algorithm for generation of phase-only hologram with artifacts suppression[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 1412-1427.
- [42] Kim Y K, Ryu W J, Lee J S, et al. Histogram compensation algorithm for an efficient phase-only hologram calculation[J]. Optics Express, 2020, 28(26): 40164-40175.
- [43] 美)潘定中(Ting-Chung Poon), 美)刘荣平(Jung-Ping Liu). 现代数字全息导论[M]. 闫兴鹏, 严志强, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018: 141-143.
Poon T C, Liu J P. Introduction to modern digital holography[M]. Yan X P, Yan Z Q, Transl. Beijing: China Machine Press, 2018: 141-143.
- [44] Shimobaba T, Kakue T, Endo Y, et al. Random phase-free kinoform for large objects[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17269-17274.
- [45] Chen L Z, Tian S Z, Zhang H, et al. Phase hologram optimization with bandwidth constraint strategy for speckle-free optical reconstruction[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 11645-11663.
- [46] Pang H, Wang J Z, Zhang M, et al. Non-iterative phase-only Fourier hologram generation with high image quality[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14323-14333.
- [47] Hauck R, Bryngdahl O. Computer-generated holograms with pulse-density modulation[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1984, 1(1): 5-10.
- [48] Tsang P W M, Poon T C. Novel method for converting digital Fresnel hologram to phase-only hologram based on bidirectional error diffusion[J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23680-23686.
- [49] Tsang P W M, Jiao A S M, Poon T C. Fast conversion of digital Fresnel hologram to phase-only hologram based on localized error diffusion and redistribution[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5060-5066.
- [50] 胡建华, 王云宽, 王慎航, 等. 自适应噪声调制多级误差扩散算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(11): 1974-1980.
Hu J H, Wang Y K, Wang S H, et al. An adaptive noise modulation multilevel error diffusion algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(11): 1974-1980.
- [51] 周婷婷, 韩超. 三维纯相位全息显示中的散斑噪声抑制[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1209001.
Zhou T T, Han C. Speckle noise suppression in three-dimensional phase-only holographic display[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1209001.
- [52] Fischer D, Sinzinger S. Evaluation of quadratic phase hologram calculation algorithms in the Fourier regime[J]. Applied Optics, 2020, 59(6): 1501-1506.
- [53] Liu K X, He Z H, Cao L C. Pattern-adaptive error diffusion algorithm for improved phase-only hologram generation[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(5): 050501.
- [54] Barten P G J. Evaluation of subjective image quality with the square-root integral method[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1990, 7(10): 2024-2031.
- [55] Chu D P, Dowsett M G, Cooke G A. Characterization of the noise in secondary ion mass spectrometry depth profiles[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 80(12): 7104-7107.
- [56] Lehmann E L, Casella G. Theory of point estimation [M]. 2nd ed. New York: Springer, 1998.
- [57] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [58] Yang H N, Liu L, Tang H, et al. Relationship of just noticeable difference (JND) in black level and white level with image content[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(6): 470-477.
- [59] Yang H N, Chu D P. Iterative phase-only hologram generation based on the perceived image quality[J]. Applied Sciences, 2019, 9(20): 4457.
- [60] Alsaka D Y, Arpali Ç, Arpali S A. A comparison of iterative Fourier transform algorithms for image quality estimation[J]. Optical Review, 2018, 25(5): 625-637.