

基于细菌觅食算法的波前编码相位掩模的优化研究

陆宇,张星煦,赵廷玉

(浙江理工大学理学院物理系,杭州 310018)

摘要:为延拓光学成像系统的景深,获得对物距不敏感的波前编码光学成像系统,需求得最佳的相位掩模参数。以经典的三次相位掩模为研究对象,采用细菌觅食算法,优化了焦距为200.0 mm、入瞳直径为25.4 mm的双胶合波前编码系统。仿真和实验结果表明:未加相位掩模的普通光学系统景深仅为30.0 mm,而插入优化后的相位掩模的波前编码系统景深可达80.0 mm,大大拓展了景深。细菌觅食算法优化波前编码系统的相位掩模有着运算速度快、易跳出局部最优解的优点。

关键词:细菌觅食算法;波前编码;相位掩模;优化;景深

中图分类号: TS195.644

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2017)04-0604-07

0 引言

光学成像系统的景深延拓是应用光学领域的热点问题。Dowski等提出的波前编码成像技术常用于延拓非相干光学系统的景深^[1]。波前编码光学成像技术是在光学系统中引入自由曲面形式的相位掩模对物体进行光学编码,使得系统对物距的变化不敏感,即不同物距下光学传递函数(optical transfer function, OTF)和点扩散函数(point spread function, PSF)保持不变^[2]。因此物距不同的点,在成像面上会得到模糊程度一致的图像。利用数字滤波技术对模糊图像处理可获得最终的清晰图像。波前编码技术在不影响成像分辨率的前提下,可大大拓展光学系统的景深,增加图像的信息量,并且有效抑制了离焦相关的像差,减少光学元件个数,降低成本。这项技术特别适用于实时显示立体动态物体,在显微成像、手机摄像、红外空空导弹等方面具有广泛的应用前景。

自由曲面形式的相位掩模的优化设计是实现波前编码系统的关键技术,而合适的优化算法是相位掩模优化设计的重要组成部分。目前,常用于优化相位掩模的算法有遗传算法^[3-4]、模拟退火算法^[5]

等。传统优化算法从单个初始值开始迭代寻求最优解,算法简单但容易陷入局部最优解。模拟退火算法在传统算法的基础上引入一定的概率突跳特性,在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解。该算法从较高的初始温度开始,以一定的步长降低系统温度至预设的最低温度结束。但使用该算法时产生的新解与初始解与步长大小有关;当步长较小时,该算法难以跳出局部最优解;当步长较大时,求取最优解的过程中数值波动较大,得到的最优解不稳定;所以需要多次调试参数才能获得最优解。而遗传算法不依赖于梯度信息,但可能因为搜索范围较小或变异太少导致早熟收敛,容易陷入局部最优解,而无法得到全局最优解。本文使用细菌觅食算法^[6-7]对波前编码系统的相位掩模参数进行优化,该算法具有较好的鲁棒性,且在兼顾跳出局部最优解的同时保证了算法的收敛速度,节约了光学系统设计中优化所用的时间。

1 基于细菌觅食算法的相位掩模优化

1.1 波前编码系统理论基础

波前编码由光学编码和数字图像处理两部分组

收稿日期:2017-02-26 网络出版日期:2017-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(61205158);浙江省自然科学基金项目(LY15F050013)

作者简介:陆宇(1991-),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。

通信作者:赵廷玉, E-mail: zhaotingyu@zstu.edu.cn

成,系统框图如图1所示。图1中相位掩模、透镜和CCD组成了光学编码部分,通过添加相位掩模,使得CCD探测到的图像对物距不敏感,再对图像进行复原,获得最终的清晰图像。

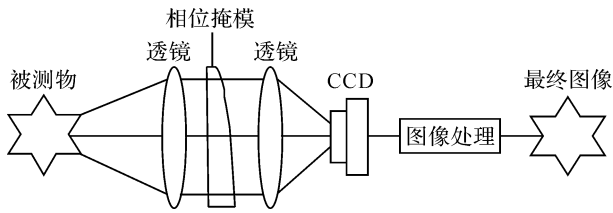


图1 波前编码系统框图

波前编码理论以光学传递函数为理论指导,采用两次变换法^[8]可以推导光学传递函数,分析其对物距的不敏感性。波前编码系统的光瞳函数 $P(x, y, \phi)$ 可以表示为:

$$P(x, y, \phi) = p(x, y) \exp\{j[\varphi(x, y) + \psi(x, y)]\} \quad (1)$$

其中: $p(x, y) = \begin{cases} 1, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq D/2 \\ 0, & \sqrt{x^2 + y^2} > D/2 \end{cases}$ 表示圆形的通光函数;

(x, y) 为光瞳面坐标; D 为光瞳直径; j 为虚数单位; $\varphi(x, y)$ 为相位掩模的表达形式,以经典的三次相位掩模(cubic phase mask, CPM)为例,其表达形式为 $\varphi_{\text{cpm}} = \alpha(x^3 + y^3)$,其中 α 为三次相位掩模的参数。 ψ 为与物距有关的参量,具体表示为:

$$\psi = \frac{\pi D^2}{4\lambda} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_i} \right) \quad (2)$$

其中: λ 为光的波长; D 为光学系统的入瞳直径; f 为焦距; d_o 和 d_i 分别为物距和像距。

在傅里叶光学理论中,光学系统的点扩散函数表征了光学系统在空间域上的成像特性,它与光瞳函数的关系可以表示为:

$$h(x', y', \phi) = \kappa \{F[P(x, y, \phi)]\} \{F^*[P(x, y, \phi)]\} \quad (3)$$

其中: κ 为常数,在实际计算时通常忽略不计^[9]; F 表示傅里叶变换。

光学传递函数是点扩散函数的傅里叶变换,其表达式为:

$$H(u, v, \phi) = F[h(x', y', \phi)] \quad (4)$$

调制传递函数(modulation transfer function, MTF)是输出像与输入像的对比度之比,可表示为光学传递函数的模:

$$M(u, v, \phi) = |H(u, v, \phi)| \quad (5)$$

从上面的分析可知,光学传递函数和点扩散函

数两者都表示光学系统的成像能力,前者在频域中表示,后者在空间域中表示。从式(4)可知,两者之间存在傅立叶变换关系。因此,如果一个系统的光学传递函数对物距不敏感,则其点扩散函数也不敏感;反之亦然。考虑到光学传递函数是复函数,从计算的简便性出发,光学上通常用调制传递函数替代光学传递函数,即调制传递函数和点扩散函数都可以用来表示对物距的敏感性。

1.2 评价函数

本文用调制传递函数来表示光学系统的成像能力。波前编码光学系统所成的像对物距不敏感,即处于不同物距下的物体在像面的模糊程度一致,不同物距下的调制传递函数或点扩散函数相同。与此同时,光学系统生成的中间图像的模糊程度不能超过图像处理的极限,系统在低频段的MTF值不能太低,这样模糊图像可实现复原。

本文使用费希尔信息量^[10-11]评价调制传递函数的离焦不变性,综合考虑数字图像处理中图像的复原质量,对调制传递函数加以限制,得出评价函数如下:

$$\begin{cases} \min \left\{ \int_{-\psi_{\max}}^{\psi_{\max}} \int_{-u_{\max}}^{u_{\max}} M(u, \psi) \left[\frac{\partial}{\partial \psi} \ln M(u, \psi) \right] \left[\frac{\partial}{\partial \psi} \ln M(u, \psi) \right]^T du d\psi \right\} \\ \text{s. t.} \quad M(u, \psi) \geq th \end{cases} \quad (6)$$

其中: u 为空间频率, $M(u, \psi)$ 为光学系统的MTF, th 为系统可接受的最小MTF。

1.3 基于细菌觅食算法的相位掩模板优化

在构建评价函数的基础上,需要优化搜索算法求解最佳的相位掩模的参数。为了保证对参数全局优化和收敛速度,本文选择了细菌觅食算法进行优化。

细菌觅食算法是模拟大肠杆菌觅食行为的一种新型算法。近年来已被用于解决实际中的数学问题^[12-13]。细菌觅食包含趋化、复制和驱散三种行为方式。趋化是指细菌通过翻转和前进,向营养丰富的地方聚集。翻转是指细菌向随机方向移动,前进是指根据翻转后细菌的评价函数值,决定细菌接下来的是否按照原方向继续移动。复制是根据评价函数值,选择较差的细菌继承较好细菌的位置,加快寻优速度。细菌通过趋化和复制可获得局部最优解。驱散是让细菌以一定概率出现在搜索空间的任意位置,可跳出局部最优解,从而寻找全局最优解。

细菌觅食算法求解相位板的最佳参数的流程如图2所示,步骤如下:

a) 初始化参数。设置相位板参数的搜索范围 $(\alpha_{\min}, \alpha_{\max})$, 细菌总数 S , 趋化步数 N_c , 单项运动最大次数 N_s , 复制次数 N_{re} , 驱散次数 N_{ed} , 驱散概率 P_{ed} 。

b) 随机产生 S 组初始解 P_0 , 不满足限制条件 $MTF > th$ 的解重新生成。

c) 驱散次数加 1, 判断是否达到驱散结束条件。是, 输出解 P_0 ; 否, 进行下一步。

d) 复制次数加 1, 判断是否达到复制结束条件。是, 评价函数值较大的 $S/2$ 组细菌死亡, 剩下的 $S/2$ 组细菌一分为二, 保留细菌总数 S , 跳至步骤 c; 否, 进行下一步。

e) 趋化次数加 1, 判断是否达到趋化结束条件。是, 转步骤 f; 否, 转步骤 g。

f) S 组解以一定概率随机出现在解空间内, 转步骤 d。

g) 计算解 P_0 的评价函数 $J_0(1:S)$ 。

h) 产生新解 $P_1(1:S)$, 并计算其评价函数 $J_1(1:S)$ 。

i) 比较 J_0 和 J_1 中各组值, 将评价函数值较好的解保存至 $P(0:S)$, 再将最优值赋予 $P_0(0:S)$ 。

j) 运动步数加 1, 判断是否达到单项最大运动次数。是, 转步骤 e; 否, 转步骤 g。

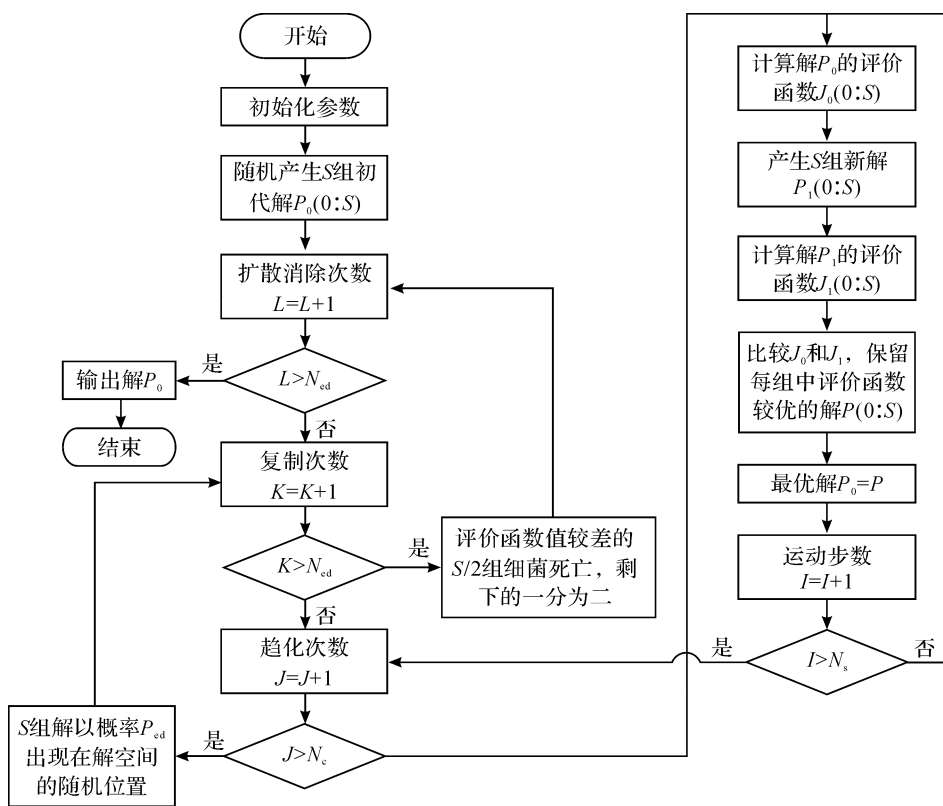


图2 基于细菌觅食算法的波前编码系统相位板参数优化流程

2 优化结果与分析

针对焦距为 200.0 mm, 通光孔径为 25.4 mm 的双胶合透镜(GCL-010606, 大恒光电)光学系统进行优化设计。以经典的三次相位掩模为例, 在光学系统的光瞳面插入相位掩模, 使用细菌觅食算法进行优化设计。考虑到图像的大部分能量都集中在低频段, 取 $u_{\max} = 70$ 线对/mm, 为确保模糊图像可被复原, 设阈值 $th = 0.1$ 。初始参数取解空间为 $[0, 100]$, 细菌总数 $S = 8$, 趋化步数 $N_c = 3$, 单项运动最

大次数 $N_s = 3$, 复制次数 $N_{re} = 3$, 驱散次数 $N_{ed} = 3$, 驱散概率 $P_{ed} = 0.3$ 。使用细菌觅食算法进行多次优化, 得到的相位板参数值的波动在 2% 以内, 较为稳定。多次优化取平均值, 得出最佳相位板参数: $\alpha = 66.21$ 。图 3 为插入优化后的三次相位掩模的波前编码系统在不同物距下的 MTF 曲线。可见, 插入优化后的相位掩模后, 虽然光学系统的 MTF 值下降, 但各种物距下的 MTF 曲线基本重合, 并且 MTF 没有零点, 意味着低频与高频的图像信息没有丢失。

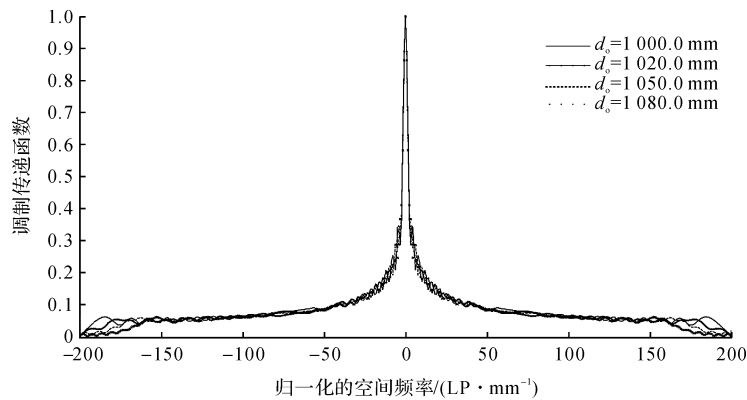


图3 三次相位板波前编码MTF曲线

本文仿真了传统的光学系统,即只有双胶合透镜没有相位掩模板的情况作为对比。光学系统在不同物距下的调制传递函数曲线如图4所示。由图4

可见,该系统对1000.0 mm的物距清晰成像,随着物距 d_o 偏离量的增加,系统的MTF曲线变化明显,MTF值迅速下降并出现零点,造成了图像信息丢失。

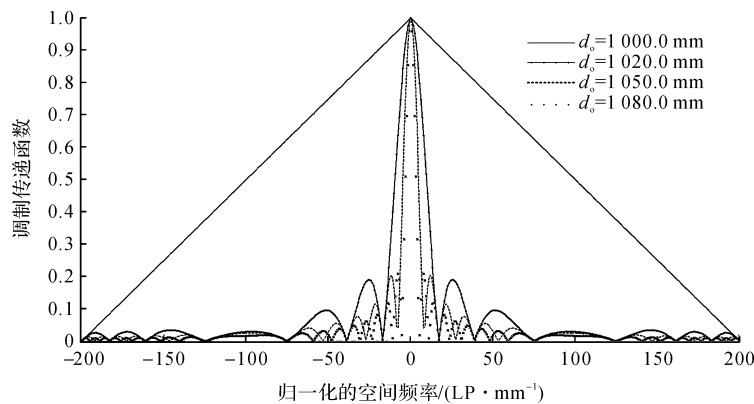
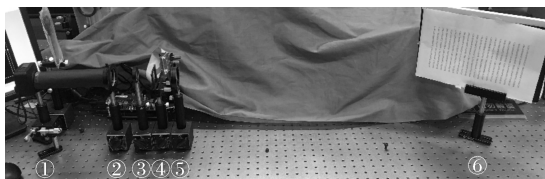


图4 相位掩模加入前的传统光学系统MTF曲线

3 实验结果

为了验证上述的仿真结果,本文搭建了实验装置,如图5所示。相位掩模采用Holoeye空间光调制器(spatial liquid modulation, SLM)(型号:SLM-0017)实现,SLM前后的偏振片是为了实现相位调制而采用^[14]。从左往右依次为CCD相机、偏振片、双胶合透镜、SLM-0017、偏振片、被测物。被测书本倾斜放置,使得每行字与光学系统之间的距离不同,便于比较不同物距下的成像质量。



1. CCD相机;2. 偏振片;3. 双胶合透镜;4. 空间光调制器;
5. 偏振片;6. 被测物

图5 实验实物照片

考虑PSF容易测得,下面用PSF评价实际光学系统的成像特征,像面捕捉到的传统光学系统(未

加相位掩模)与波前编码系统(加入相位掩模)的PSF如图6和图7所示。可以发现,传统光学系统在对焦时,其PSF为一个锐利的点,但当离焦时,PSF退化为弥散斑,且随着物距偏离量的增大,弥散斑越来越大,导致成像性能恶化,直至无法分辨图像。但对于插入相位掩模的波前编码光学成像系统,在对焦时,PSF为弥散斑(形状和大小由相位掩模板形式决定),虽然会导致模糊,但随着物距偏离量的增大,PSF几乎不变,这样便可以使用同一种滤波器进行复原,得到清晰图像。

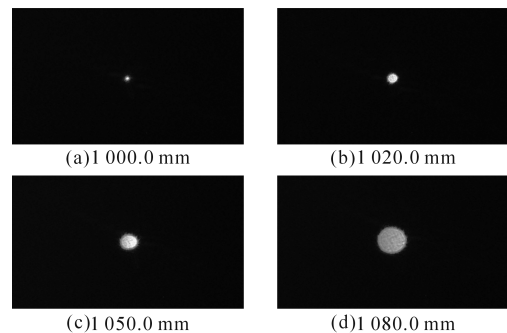


图6 传统光学系统不同物距下的PSF

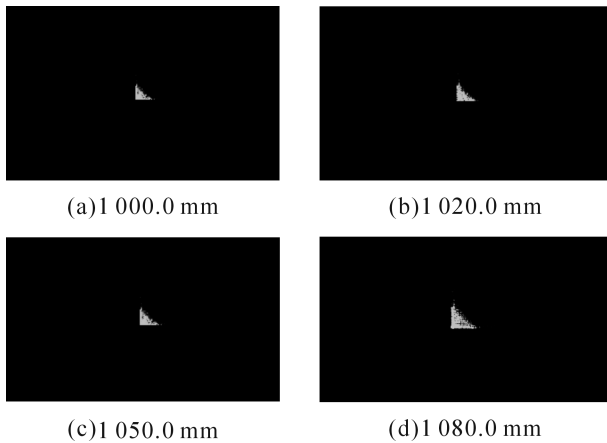


图7 波前编码系统不同物距下的PSF

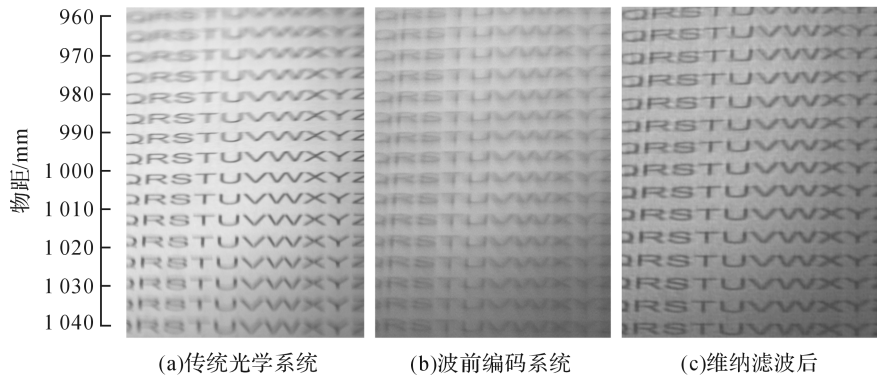


图8 传统光学系统与波前编码系统成像的比较

4 细菌觅食算法和模拟退火算法的对比

本文分别使用细菌觅食算法和经典的模拟退火算法优化相位掩模并对比优化结果。后者在局部寻优的基础上,在当前解的邻域内随机产生一个新解,在温度参数的控制下,除了接受优化解之外,还根据Metropolis准则,以一定的概率接受恶化解。这使

图8为传统光学系统和波前编码系统的实际成像比较。传统光学系统实际成像如图8(a)所示,从图中可以看出,被测书本中间部分的文字清晰可见但随着物距偏离量的增大,图像的模糊程度越来越大,上下两端的文字已经完全模糊,无法进行分辨。而使用插入优化后的相位掩模板的波前编码系统,图像的模糊程度一致,如图8(b)所示。导致图像模糊的PSF如图7所示,以此作为反卷积核,使用简单的维纳滤波算法^[15]可复原出较为清晰的最终图像如图8(c)所示,可以看到整幅图像都清晰可见,实现了大景深成像。未加相位掩模的光学系统景深为30.0 mm,而加入相位掩模的双胶合系统的清晰成像的景深延拓至80.0 mm,实现了景深的延拓。

得该算法具有跳出局部最优解的能力。但产生的新解大小与预设的步径或领域有关,预设值较小时算法跳不出局部最优解;当该预设值较大时可能导致跳过全局最优解或多次所得最优解的数值波动较大。该算法需要多次调试找到合适的参数才能快速准确的得到全局最优解。表1中给出初始温度 T_0 ,截止温度 T_1 ,步径 m 与最佳参数 α 和所用时间 t 的关系。

表1 模拟退火算法不同参数的优化比较

优化结果	迭代次数	优化参数					
		$T_0:30;$ $T_1:8;$ $m:5 \times 10^{-3}$	$T_0:30;$ $T_1:8;$ $m:1 \times 10^{-2}$	$T_0:30;$ $T_1:8;$ $m:5 \times 10^{-3}$	$T_0:20;$ $T_1:8;$ $m:1 \times 10^{-2}$	$T_0:10;$ $T_1:8;$ $m:1 \times 10^{-2}$	$T_0:20;$ $T_1:8;$ $m:5 \times 10^{-3}$
		$T_0:10;$ $T_1:2;$ $m:1 \times 10^{-2}$	$T_0:20;$ $T_1:8;$ $m:5 \times 10^{-3}$	$T_0:10;$ $T_1:8;$ $m:1 \times 10^{-2}$	$T_0:20;$ $T_1:8;$ $m:5 \times 10^{-3}$	$T_0:10;$ $T_1:2;$ $m:1 \times 10^{-2}$	$T_0:20;$ $T_1:8;$ $m:5 \times 10^{-3}$
时间/s	1	46.68	49.14	31.94	31.82	14.26	31.82
	2	46.87	49.51	32.01	31.81	14.08	32.32
	3	46.35	46.32	31.99	31.79	14.09	31.78
	4	46.63	47.25	32.66	31.76	14.12	31.92
	5	46.12	45.84	32.71	31.82	14.20	32.18
α	1	44.58	66.41	63.34	66.60	66.11	43.54
	2	36.49	66.39	65.44	66.16	50.99	43.39
	3	40.17	66.67	61.57	65.49	50.71	43.96
	4	43.19	65.72	60.63	66.29	59.74	43.96
	4	42.28	66.48	62.56	66.12	64.26	43.96

由表 1 可知, T_1 和 T_0 不变时, 当 m 较大时, 最优解 α 波动较大; 当 m 较小时, α 难以跳出局部最优解。当 m 不变, 温度差较大时, 程序运行时间增加; 当 T_0 较小时, 陷入局部最优解。需多次调整才可快捷准确的使用。总体而言, 模拟退火算法容易陷入局部最优解, 而较难得到全局最优解, 如表 1 的第三列和最后两列, 优化得到的参数均超过 40, 和最优解 66.21 相差很大。

而细菌觅食算法求解相位掩模的参数鲁棒性强, 使用简单, 产生的新解为解空间的随机数, 与步径无关。算法运行时间与细菌总数, 趋化步数, 单项运动最大次数, 复制次数, 驱散次数等有关, 参数的设置较易。细菌算法用时和优化参数如表 2 所示。

表 2 细菌觅食算法不同参数的优化比较

优化结果	迭代次数	优化参数		
		$N_s:3; N_c:3;$ $N_{re}:3; N_{ed}:3$	$N_s:4; N_c:4;$ $N_{re}:4; N_{ed}:4$	$N_s:5; N_c:5;$ $N_{re}:5; N_{ed}:5$
时间 /s	1	10.54	24.50	47.28
	2	10.18	24.27	32.01
	3	10.27	24.23	31.99
	4	10.19	23.67	32.66
	5	10.81	24.05	32.71
α	1	65.92	66.69	66.34
	2	66.49	66.73	66.44
	3	66.17	66.39	66.57
	4	66.19	65.72	66.63
	4	66.28	66.48	66.56

由表 2 可知, 尽管细菌觅食算法使用的初始参数不同, 但优化结果基本在全局最优解附近波动。也就是说, 使用细菌觅食算法进行优化时, 各运算步骤较小时便可求得较稳定的最优解, 且多次优化的最优解 α 的波动较小。由于该算法是在解空间内全局搜索, 所用极易跳出局部最优解。

5 结 论

本文提出的基于细菌觅食算法的波前编码系统相位板的优化, 以费希尔信息量评价系统 MTF 的离焦不敏感性, 优化得出了三次相位板的最佳参数。细菌觅食算法具有良好的鲁棒性, 在对搜索范围进行合适的调整后, 便可快速有效地进行运算, 具有群体智能算法并行搜索、易跳出局部极小值等优点, 以较短的时间求得相位板参数全局最优解。对焦距 $f=200.0$ mm, 入瞳直径 $D=25.4$ mm 的双胶合成像系统进行成像实验, 插入优化后的相位掩模板, 不同物距的点扩散函数具有极高的相似性。实验结果

表明像面探测到的图像在不同物距下模糊程度具有一致性, 使用同一个的维纳滤波器进行图像处理可获得最终的清晰图像, 最终将双胶合系统的清晰成像的景深延拓至 80.0 mm, 是未加相位掩模的传统系统的 2.7 倍, 实现了景深延拓的目的。

参考文献:

- [1] DOWSKI E R, CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. Applied Optics, 1995, 34(11): 1859-66.
- [2] LIU J, MIAO E, SUI Y, et al. Optimized non-integer order phase mask to extend the depth of field of an imaging system[J]. Optics Communications, 2016, 374: 92-96.
- [3] 黄薇薇, 叶子, 张文字, 等. 基于遗传算法的波前编码相位板参数优化[J]. 光学仪器, 2007, 29(4): 17-22.
- [4] 闫锋. 基于调制传递函数相似度的波前编码系统优化技术[J]. 光学学报, 2013(4): 68-73.
- [5] 张文字, 陈燕萍, 赵廷玉, 等. 一种基于 OTF 稳定性的波前编码相位板优化方法[J]. 光子学报, 2007, 36(11): 2017-2021.
- [6] PASSINO K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control[J]. IEEE Control Systems, 2002, 22(3): 52-67.
- [7] ELATTAR E E. Adaptive bacterial foraging and genetic algorithm for unit commitment problem with ramp rate constraint[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 26(7): 1555-1569.
- [8] 庄松林. 光学传递函数[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 276-282.
- [9] 陈燕萍. 景深延拓波前编码系统理论及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 6-7.
- [10] PRASAD S. Fisher-information-based analysis of a phase-diversity-speckle imaging system[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2004, 21(11): pp. 2073-88.
- [11] MOTKA L, STOKLASA B, D'ANGELO M, et al. Optical resolution from Fisher information[J]. The European Physical Journal Plus, 2016, 131(5): 1-13.
- [12] 李珺, 党建武. 细菌觅食算法求解高维优化问题[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(4): 1024-1027.
- [13] 王飞, 边会媛, 韩雪, 等. 基于细菌觅食算法的砂砾岩岩性识别方法[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(2): 277-284.
- [14] 陈栋. 基于液晶空间光调制的波前可控技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011: 17-19.
- [15] 胡小平, 陈国良, 毛征宇, 等. 离焦模糊图像的维纳滤波复原研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(3): 479-482.

The Optimization of the Phase Mask in a Wavefront Coding System Based on Bacterial Foraging Algorithm

LU Yu, ZHANG Xingxu, ZHAO Tingyu

(Department of Physics, School of Sciences, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to extend the depth of field of an optical system and acquire a wavefront coding system insensitive to the object distance, the optimal parameters of the phase mask need to be obtained. A doublet system with a classical cubic phase mask is optimized based on bacterial foraging algorithm. The focal length is 200.0 mm and entrance pupil diameter is 25.4 mm in the doublet system. The simulation and experimental results show that the depth of field in traditional optical system is only 30.0 mm, while it is 80.0 mm in the wavefront coding system by adding the optimized phase mask. It greatly extends the depth of field. Optimization using bacterial foraging algorithm have a fast speed and easy to jump out of local optimal solution.

Key words: bacterial foraging algorithm; wavefront coding; phase mask; optimization; depth of field

(责任编辑: 康 锋)