

引用格式: YANG Huizhen, ZANG Xiangdong, ZHANG Zhiguang, et al. Wavefront Correction System Based on RUN Optimization Algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(11):1111004

杨慧珍,臧祥栋,张之光,等.基于RUN优化算法的波前校正系统[J].光子学报,2023,52(11):1111004

基于RUN优化算法的波前校正系统

杨慧珍^{1,2},臧祥栋¹,张之光¹,刘金龙¹

(1 江苏海洋大学 电子工程学院,连云港 222005)

(2 金陵科技学院 网络与通信工程学院,南京 211169)

摘要:将龙格-库塔优化器用于无波前探测自适应光学系统,提出基于RUN的自适应光学控制方法。以61单元变形镜为波前校正器件,不同湍流强度下的畸变波前为校正对象,建立基于RUN优化算法的自适应光学系统模型。对比分析基于RUN、PSO、DEA和GA等算法的波前校正效果、校正速度和局部极值。结果表明,相比基于粒子群优化算法、差分进化算法和遗传算法的自适应光学系统,在取得相同校正效果时,基于RUN优化算法的波前校正系统在不同湍流条件下的校正速度均提高三倍以上,且RUN算法不易陷入局部极值。研究结果可为基于RUN优化算法的波前校正系统的实际应用提供理论基础。

关键词:自适应光学;控制算法;龙格-库塔优化器;变形镜;波前校正

中图分类号:TP273.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235211.1111004

0 引言

光透过畸变介质或者不完备的成像系统后会产生静态或动态畸变,严重影响光学系统的成像性能。自适应光学(Adaptive Optics, AO)^[1-3]技术是校正波前像差的重要手段,已用于多个领域,如显微成像^[4]、人眼视网膜成像^[5]、内窥镜^[6]、光束整形^[7]及天文成像^[8]等。自适应光学系统按照原理可以分为两大类,即常规自适应光学系统和无波前探测自适应光学系统。常规自适应光学系统因为存在波前传感器,使得自适应光学系统成本高,结构复杂。对于要求结构小型化的领域,常规自适应光学系统已不能满足应用需求。无波前探测自适应光学系统由于不需要波前探测环节,系统结构简单,便于实现,且可应用于常规自适应光学系统无法工作的应用环境,近几年得到了广泛研究。系统控制算法是决定无波前探测自适应光学系统校正性能的关键因素。

现有无波前探测自适应光学系统控制算法大致可分为三类:基于种群优化的元启发类,如遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[9-10]、粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[11-12]和差分进化算法(Differential Evolution Algorithm, DEA)^[13]等;基于数学原理的梯度下降类,如随机并行梯度下降(Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD)算法^[14]及其各种变形^[15-17];基于物理原理的模型式^[18]及其改进算法^[19-21]。三大类方法在自适应光学系统控制中均有所应用,各有其优劣势,比如元启发式算法收敛速度相对慢,但全局收敛性好;SPGD方法收敛速度相对快,但全局寻优能力差;模型类算法收敛速度最快,但是需要大量预处理。

AHMADIANFAR I等于2021年提出龙格-库塔优化器(RUNge Kutta Optimizer, RUN)^[22]。作为一种新兴的元启发式算法,RUN算法是一种无隐喻的种群优化方法,运用四阶龙格-库塔(Runge Kutta, RK)数学方法计算梯度进行种群的优化^[23]。以该方法作为全局搜索逻辑,能够有效地探索和搜索空间中的目标区域。RUN优化算法能处理各种优化问题,目前,已经成功运用到热力学^[24]和电力工程^[25]等工程领域。本文

基金项目:国家自然科学基金(Nos. U2141255, 11573011),金陵科技学院高层次人才研究项目(No. jit-rcyj-202301)

第一作者:杨慧珍, yanghz@jit.edu.cn

通讯作者:刘金龙, liujinlong@jou.edu.cn

收稿日期:2023-05-25;录用日期:2023-07-17

http://www.photon.ac.cn

提出将基于种群优化的RUN优化算法用于自适应光学系统控制,考察基于RUN的自适应光学系统波前校正性能。

以61单元变形镜作为波前校正器件,不同湍流强度下的畸变波前作为校正对象,建立基于RUN优化算法的自适应光学系统模型。通过点目标成像模拟实验,对比分析基于RUN、PSO、DEA和GA的波前校正系统在不同湍流强度下的校正效果和校正速度,以及陷入局部极值的情况。

1 基于RUN的AO系统控制方法

以波前校正器的驱动电压作为控制信号时,粒子位置代表校正器的驱动电压。算法迭代过程中,种群粒子在搜索空间中探索和开发。假设波前校正器的驱动器单元数为 M ,则驱动器电压的求解转化为一个 M 维优化问题,基于RUN的AO系统控制方法包括以下三个阶段。

初始化阶段。设置种群大小为 N ,每一个个体都是 M 维的粒子,粒子的初始位置 $X_{j,M}(j=1,2,\dots,N)$ 通过式(1)确定。

$$X_{j,M} = L_M + R \times (U_M - L_M) \quad (1)$$

式中, U_M 和 L_M 分别是 M 维搜索空间的下边界和上边界, R 是 $[0,1]$ 范围内的随机数。将种群初始位置作为控制参数施加到波前校正器,再通过图像采集卡将图像传感器信息读入控制模块。把表征波前畸变程度的性能指标作为优化算法的目标函数,计算目标函数值。分析出目前全局最优解 x_{gbest} 。

位置更新阶段。当 $R \geq 0.5$ (R 为 $[0,1]$ 之间的随机数),粒子根据开发结果产生新位置;否则粒子根据探索结果产生新位置。为了保证解的质量,经过解质量增强(Enhanced Solution Quality, ESQ)环节,避免每次迭代中陷入局部最优,从而进一步寻优。为实现适当的全局和局部搜索,使用四阶RK方法作为探索和开发的主要搜索机制。设目标函数为 $y(x)$, x 是 M 维粒子,即粒子的位置,对应波前校正器驱动电压向量。四阶RK公式基于四个系数的加权平均值,表示为

$$y(x + \Delta x) = y(x) + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \Delta x \quad (2)$$

式中, k_1, k_2, k_3, k_4 四个系数因子分别为

$$k_1 = y'(x) = f(x, y) \quad (3)$$

$$k_2 = f\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta x}{2} \times k_1\right) \quad (4)$$

$$k_3 = f\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta x}{2} \times k_2\right) \quad (5)$$

$$k_4 = f(x + \Delta x, y + \Delta x \times k_3) \quad (6)$$

校正阶段。完成种群中每个粒子的位置更新并修正 x_{gbest} 。将 x_{gbest} 经过数模转换、放大施加到波前校正器,校正残余波前,完成一次迭代。

当算法满足校正要求或者预先设置迭代条件时,可得到全局最优控制信号。将该信号经过数模转换、放大施加到波前校正器,完成波前畸变校正。算法不满足终止条件时,继续执行优化算法,进行下一次迭代。基于RUN的AO系统控制方法流程如图1。

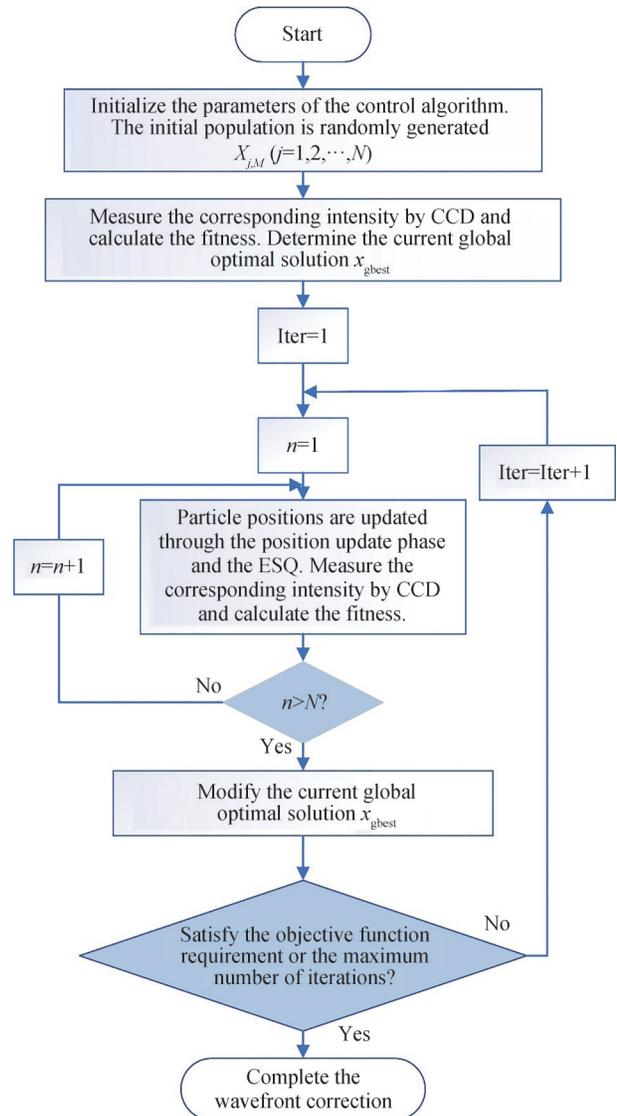


图1 基于RUN的AO系统控制方法流程
Fig. 1 The flow of RUN optimization algorithm

2 基于RUN优化算法的波前校正系统

基于RUN优化算法的波前校正系统如图2,以61单元变形镜(Deformable Mirror, DM)作为波前校正器,以电耦合元件(Charge Couple Device, CCD)作为图像传感器。系统主要由DM、CCD、透镜、控制模块、图像采集卡、数模转换器、高压放大器组成。当光波通过随机介质时,入射光波发生畸变,畸变后的入射光经过变形镜反射,通过聚焦透镜到达CCD相机成像。基于RUN的AO系统控制方法利用图像采集卡采集的图像数据计算DM的控制信号。数模转换器将数字控制信号转换为模拟信号,再由高压放大器将控制信号放大后施加到变形镜,完成一次闭环校正。其中61单元DM驱动器排布位置如图3,驱动器之间呈三角形分布。

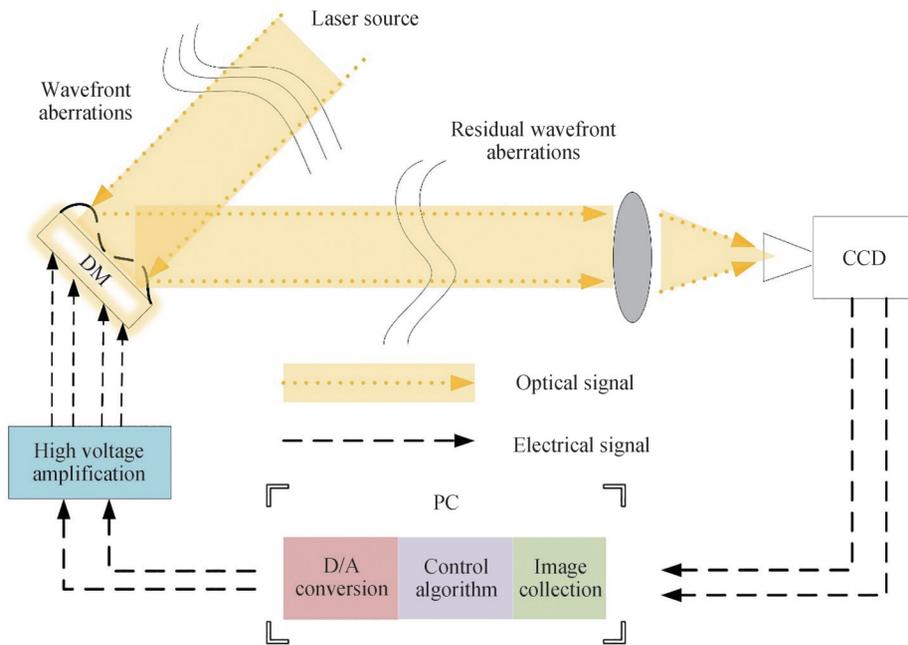


图2 无波前探测自适应光学系统
Fig.2 Wavefront sensorless adaptive optics system

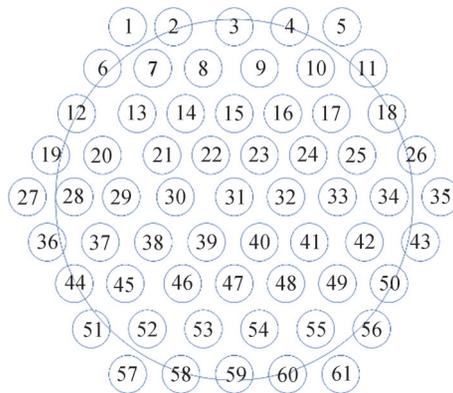


图3 61单元变形镜驱动器位置分布
Fig.3 The driver distribution of 61 element deformable mirror

根据DM补偿原理,补偿相位由DM各驱动器的影响函数线性组合而成,可表示为

$$\theta(x, y) = \sum_{i=1}^M q_i Q_i(x, y) \quad (7)$$

$$Q_i(x, y) = \exp \left\{ \ln A \left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} / z \right)^b \right\} \quad (8)$$

式中, q_i 是第 i 个驱动器的控制信号, $Q_i(x, y)$ 是第 i 个 DM 驱动器影响函数。 (x, y) 是波前平面上的坐标, (x_i, y_i) 是 DM 第 i 个驱动器上的坐标, z 是驱动器间距, A 是驱动器之间的耦合值, b 是高斯指数, 实际测量 $A=0.08$, $b=2$ 。采用 RODDIER A N^[26] 所提出的方法生成相屏模拟畸变波前, 不同相屏之间符合 Kolmogorov 功率谱模型, 各相屏之间不存在相关性。相屏由 3~104 阶 Zernike 像差组成, 不包括倾斜项。湍流对望远镜成像的影响用 D/r_0 表示, D 是望远镜口径, r_0 是大气相干长度。 D/r_0 值越大, 表明光波受湍流影响越大。

用反映光斑弥散程度的性能指标-平均半径 (Mean Radius, MR) 作为优化算法目标函数, MR 表达式为

$$MR = \frac{\iint |(u, v) - (u', v')| I(u, v) dudv}{\iint I(u, v) dudv} \quad (9)$$

式中, (u', v') 是像平面质心坐标, 计算公式为

$$u' = \frac{\iint uI(u, v) dudv}{\iint I(u, v) dudv}, v' = \frac{\iint vI(u, v) dudv}{\iint I(u, v) dudv} \quad (10)$$

$|(u, v) - (u', v')|$ 为光斑坐标 (u, v) 与平面质心 (u', v') 之间的距离, $I(u, v)$ 是畸变波前对应的远场光斑光强分布。随着 AO 系统校正过程的进行, 像差变小时, MR 值也逐渐变小。记录算法迭代过程中的 MR 值, 为便于分析同时也记录相应的斯特列耳比 (Strehl Ratio, SR) 值的变化情况。

3 仿真结果与分析

分别设置 RUN、PSO、DEA 和 GA 四种算法的种群数 N 为 50, 并在每个湍流强度下设置相同的搜索空间。根据各算法的大量模拟实验结果, 选出每种算法各湍流情况下的最优参数, 并将最大迭代次数设置为 500。

3.1 校正能力对比

仿真过程中, 分别选取 $D/r_0=5$ 、 $D/r_0=10$ 和 $D/r_0=15$ 三种不同湍流强度下各 100 帧随机波前像差作为校正对象, RUN、PSO、DEA 和 GA 四种算法在三种不同湍流强度下最终校正效果如图 4。为便于分析四种算法校正效果, 图 4 同时给出了初始平均 SR 值 (Initial) 和 61 单元 DM 理想校正后的平均 SR 值 (Ideal)。

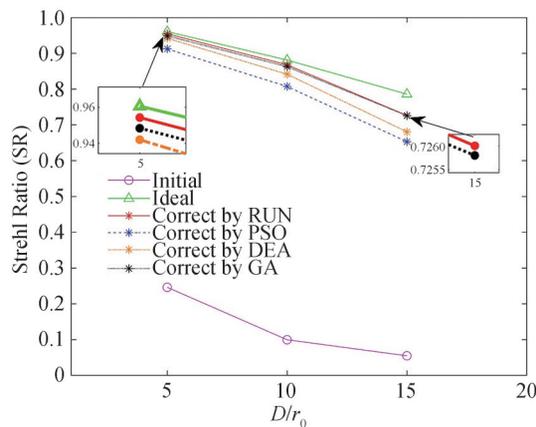


图 4 不同湍流强度下初始、理想 SR 和 RUN、PSO、DEA 和 GA 校正后 SR 的比较

Fig. 4 Comparisons of SR of the initial, the ideal, by RUN, PSO, DEA, and GA under different turbulence levels

从图 4 中可以看出随着湍流强度的增加, 校正能力稍有下降, 但四种算法均都获得了较好的校正效果。RUN 算法和 GA 算法校正效果接近, 明显优于 PSO 和 DEA。RUN 算法和 GA 算法相比, 前者略优于后者。

RUN算法的收敛结果最接近于不同湍流条件的61单元变形镜的最大校正能力。校正能力有所下降,这是因为对于固定单元数的变形镜来说,其最大校正能力是有限的。湍流强度越小,校正结果越接近理想校正。

3.2 校正速度对比

仿真过程中,分别以 $D/r_0=5$ 、 $D/r_0=10$ 和 $D/r_0=15$ 不同湍流强度下各100帧随机波前像差作为校正对象,分析RUN算法、PSO、DEA和GA四种控制算法的收敛速度。100帧随机像差的平均校正结果作为实验结果,四种算法各迭代500次。平均MR和平均SR曲线如图5。

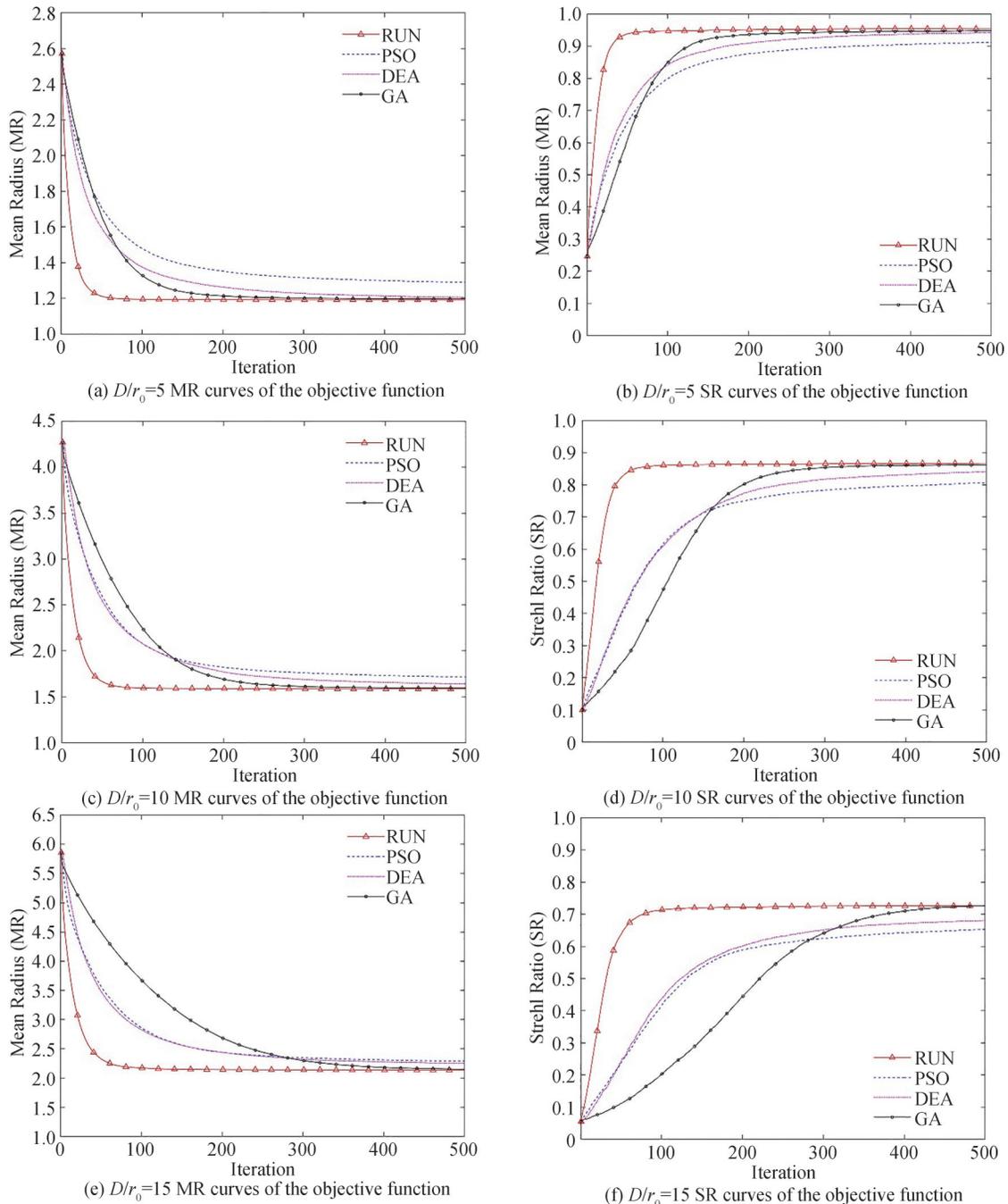


图5 分别以RUN、PSO、DEA和GA作为控制算法,自适应光学系统在不同湍流强度下的平均自适应过程
 Fig. 5 The adaptation process of the adaptive optics system under different turbulence levels using RUN, PSO, DEA and GA as control algorithms, respectively

从图5可以看出,各算法500次迭代后均已经充分收敛。对比图5中不同湍流条件下的收敛曲线可以发现,随着湍流强度的增加,不同算法收敛所需要的迭代次数均有所增加。主要是因为湍流影响增大,像差的

高频分量增加,寻优的空间空大,导致收敛时间增加。但是,对比同一湍流条件下的不同算法的收敛曲线可以发现,基于RUN的自适应光学系统收敛速度明显快于其他三种控制算法的自适应光学系统。根据仿真结果定量分析不同湍流条件下不同控制算法的收敛速度。

系统收敛速度是判断该算法能否实际应用于自适应光学控制的一条重要准则。三种不同湍流条件下,平均SR初始值分别为0.246、0.01和0.055,RUN优化算法校正后最终SR平均值分别为0.954、0.868和0.726。不同湍流强度下RUN控制算法SR校正范围的80%分别为0.813、0.714和0.592,以此作为判断标准,分析四种算法达到同一校正效果时所需要的迭代次数,结果如表1。

表1 RUN、PSO、DEA和GA校正速度对比
Table 1 Comparison of correction speed of RUN, PSO, DEA and GA

	$D/r_0=5$		$D/r_0=10$		$D/r_0=15$	
	Iterations	Time consumption (scaled)	Iterations	Time consumption (scaled)	Iterations	Time consumption (scaled)
RUN	20	1	31	1	43	1
PSO	109	5.45	152	4.90	206	4.79
DEA	85	4.25	150	4.84	188	4.37
GA	89	4.45	158	5.10	269	6.26

由表1可以看出,湍流强度为 $D/r_0=5$ 时,RUN相比PSO、DEA和GA,校正速度分别提高了约4.45、3.25、3.45倍; $D/r_0=10$ 时,校正速度分别提高了约3.90、3.84、4.10倍; $D/r_0=15$ 时,校正速度分别提高了约3.79、3.37、5.26倍。即,在取得相同校正效果时,基于RUN优化算法的波前校正系统在不同湍流条件下的校正速度均提高了三倍以上。

3.3 陷入局部极值情况分析

取湍流强度为 $D/r_0=10$ 下的一帧随机波前像差作为校正对象,分析RUN、PSO、DEA和GA陷入极值情况。RUN、PSO、DEA和GA各自随机运行100次的MR变化曲线分别如图6(a)、(b)、(c)、(d)所示,SR变化曲线分别如图6(e)、(f)、(g)、(h)所示。由图6可以看出,RUN和GA的100次随机运行迭代后均收敛到全局极值,PSO收敛到全局极值附近,DEA在100运行中有3次陷入局部极值,且RUN算法与GA相比,具有更好的收敛稳定性,鲁棒性更优。

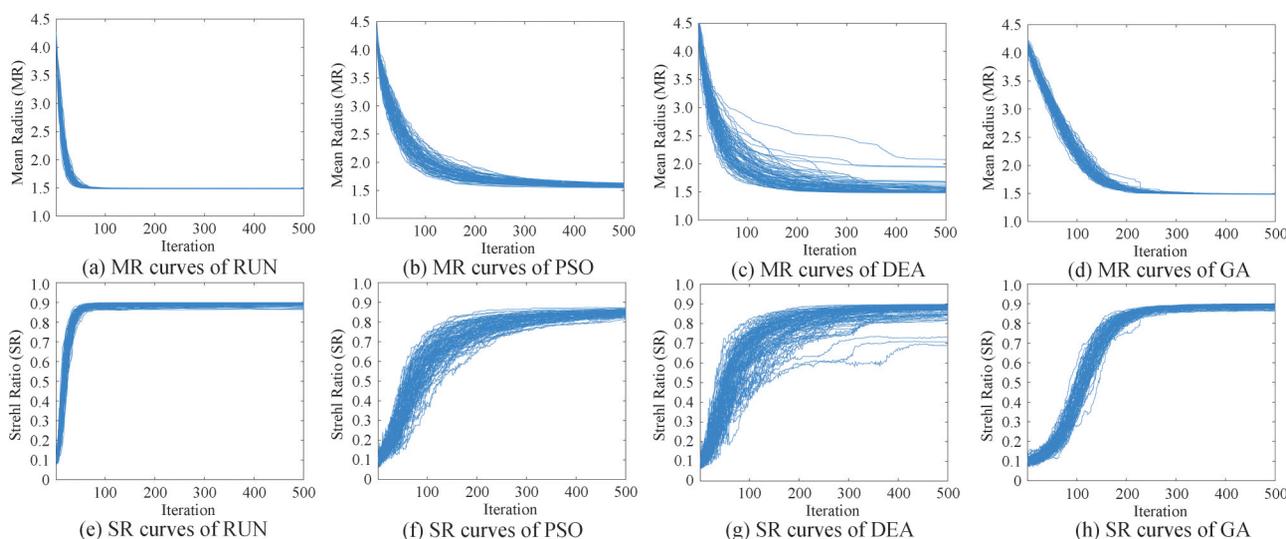


图6 同一帧像差随机运行100次,四种算法的MR和SR收敛曲线

Fig. 6 MR and SR curves of four different control algorithms when stochastic correction is performed on the same aberration for 100 times

另外,本文还以127单元变形镜作为校正器件,对基于RUN优化算法的自适应光学系统校正能力进行了模拟和分析。结果发现四种算法收敛速度变慢,收敛精度都有所提高。总体来说,RUN算法相对于

PSO、DEA 和 GA 的收敛精度和收敛速度优势和 61 单元变形镜的结论类似。收敛速度变慢的原因在于待求解的未知参数由 61 个增加到 127 个。收敛精度提高的原因在于变形镜单元数增多,校正能力增强。

4 结论

本文将基于种群优化的 RUN 优化算法用于自适应光学系统控制,考察基于 RUN 的自适应光学系统波前校正性能。RUN 算法运用四阶 RK 方法作为主要搜索机制,使搜索梯度的方向更加准确,其位置更新阶段中 ESQ 环节又进一步加强了搜索解的准确性,避免每次迭代中陷入局部最优情况,从而使 RUN 算法能够更快地搜索到最优解。与 PSO、DEA 和 GA 相比,RUN 算法的收敛结果最接近于不同湍流条件的波前校正器所能达到的最佳校正能力;在取得相同校正效果时,基于 RUN 优化算法的波前校正系统在不同湍流条件下的校正速度均提高三倍以上且全局收敛性最好。多次模拟实验发现所提出的控制算法对参数不敏感,更便于实现。研究结果为基于 RUN 优化算法的波前校正系统的实际应用提供了理论基础。当把基于 RUN 优化算法的无波前自适应光学系统用于对校正速度有要求的应用环境时,可以采用硬件实现算法,如 GPU、FPGA 等进行加速。

参考文献

- [1] JIANG Wenhan. Review on the development of adaptive optics[J]. Opto-electronic Engineering, 2018, 45(3): 170489.
姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170489.
- [2] CAO Yang, ZHANG Zupeng, PENG Xiaofeng. Wavefront distortion restoration method based on residual attention network[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(12): 1206002.
曹阳, 张祖鹏, 彭小峰. 基于残差注意力网络的波前畸变复原方法[J]. 光子学报, 2022, 51(12): 1206002.
- [3] LI Xin, WU Yang, FANG Zhou, et al. Adaptive optical image post-processing based on multi-channel blind recognition [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0201003.
李鑫, 吴阳, 方舟, 等. 基于多通道盲识别的自适应光学图像事后处理[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0201003.
- [4] YANG X, PU Y, PSALTIS D. Imaging blood cells through scattering biological tissue using speckle scanning microscopy [J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3405-3413.
- [5] FAN Wenqiang, WANG Zhichen, CHEN Baogang, et al. Application of adaptive optical coherence tomography in high-resolution retinal imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20200333.
范文强, 王志臣, 陈宝刚, 等. 自适应光学相干层析在视网膜高分辨成像中的应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20200333.
- [6] LU Jing, LI Hao, HE Yi, et al. Hyper resolution human retina confocal scanning imaging system[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(3): 272-281.
卢婧, 李昊, 何毅, 等. 超分辨率活体人眼视网膜共焦扫描成像系统[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 272-281.
- [7] VELLEKOOP IM. Feedback-based wavefront shaping[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12189-206.
- [8] HU Lifa, LIU Chao, SHEN Wen, et al. Research progress of adaptive optics in astronomical observation [J]. Science China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2017, 47(8): 7-16.
胡立发, 刘超, 申文, 等. 自适应光学技术在天文观测中的研究进展[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2017, 47(8): 7-16.
- [9] YANG W, SPRINGER M, STROHABER J, et al. Spectral phase retrieval from interferometric autocorrelation by a combination of graduated optimization and genetic algorithms[J]. Optics Express, 2010, 18(14): 15028-15038.
- [10] HAN L, DAI Y, QIU Y. Compensation for aberrant wavefront in UOWC based on adaptive optics technique employing genetic algorithm[J]. Optik, 2023, 281(5): 170832.
- [11] YANG H, LI Y. Particle swarm optimization for control of adaptive optics system[J]. AISS: Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2012, 4(22): 390-396.
- [12] TEHRANI K F, ZHANG Y, SHEN P, et al. Adaptive optics stochastic optical reconstruction microscopy (AO-STORM) by particle swarm optimization[J]. Biomedical Optics Express, 2017, 8(11): 5087-5097.
- [13] HUA Y, SUI X, ZHOU S, et al. A novel method of global optimisation for wavefront shaping based on the differential evolution algorithm[J]. Optics Communications, 2021, 481: 126541.
- [14] YANG Huizhen, LI Xinyang, JIANG Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optical systems[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1355-1360.
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1355-1360.
- [15] XU L, WANG J, YANG L, et al. Design and performance analysis of NadamSPGD algorithm for sensor-less adaptive optics in coherent FSOC systems[J]. Photonics, 2022, 9(2): 77.

- [16] ZHANG H, XU L, GUO Y, et al. Application of AdamSPGD algorithm to sensor-less adaptive optics in coherent free-space optical communication system[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7477-7490.
- [17] ZHANG Z, LUO Y, YANG H, et al. CoolMomentum-SPGD algorithm for wavefront sensor-less adaptive optics systems[J]. *Photonics*, 2023, 10(2): 102.
- [18] HUANG L, RAO C. Wavefront sensorless adaptive optics: a general model-based approach[J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 371-379.
- [19] HUANG L, YANG P, WANG S, et al. A high speed model-based approach for wavefront sensorless adaptive optics systems[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 99: 124-132.
- [20] REN H, DONG B. Improved model-based wavefront sensorless adaptive optics for extended objects using $N+2$ images [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14414-14427.
- [21] LIU M, DONG B. Efficient wavefront sensorless adaptive optics based on large dynamic crosstalk-free holographic modal wavefront sensing[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 9088-9102.
- [22] AHMADIANFAR I, HEIDARI A, GANDOMI A, et al. RUN beyond the metaphor: An efficient optimization algorithm based on Runge Kutta method[J]. *Expert Systems With Applications*, 2021, 181: 115079.
- [23] SHARP P W, FINE J M, BURRAGE K. Two-stage and three-stage diagonally implicit Runge-Kutta Nyström methods of orders three and four[J]. *IMA Journal of Numerical Analysis*, 1990, 10(4): 489-504.
- [24] GAFAR M, GINIDI A, EL-SEHIEMY R, et al. Improved SNS algorithm with high exploitative strategy for dynamic combined heat and power dispatch in co-generation systems[J]. *Energy Reports*, 2022, 8(11): 8857-8873.
- [25] CHEN H, AHMADIANFAR I, LIANG G, et al. A successful candidate strategy with Runge-Kutta optimization for multi-hydropower reservoir optimization[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 209(2): 118383.
- [26] RODDIER A N. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(10): 1174-1180.

Wavefront Correction System Based on RUN Optimization Algorithm

YANG Huizhen^{1,2}, ZANG Xiangdong¹, ZHANG Zhiguang¹, LIU Jinlong¹

(1 *School of Electronic Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China*)

(2 *Engineering School of Network & Telecommunications, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China*)

Abstract: The Wavefront Sensorless (WFSless) Adaptive Optics (AO) system is simple and easy to implement because it does not require a wavefront sensor and can be applied to some environments where conventional adaptive optics systems cannot work, such as multiphoton microscopy for biological imaging. The WFSless AO technology has not been adopted pervasively in the early days due to the lack of suitable control algorithms. With the emergence of new optimization algorithms recently, it has been widely studied and applied in related fields. Metaheuristic algorithms, e.g., Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and Differential Evolution Algorithm (DEA) are commonly used as the control algorithms of WFSless AO systems. However, these algorithms have some problems, i.e., slow convergence speed, insufficient global search efficiency, and poor adaptability to different wavefront aberrations, which make them insufficient to be applied in practice. We propose to adapt the RUNge Kutta optimizer (RUN) to the system control algorithm in this paper. An adaptive optics system model based on the RUN optimization algorithm is established with a 61-element deformable mirror as a wavefront correction device. Wavefront aberrations with different turbulence levels are used as correction objects. The performance, speed, and local extreme values of the optical systems based on RUN, PSO, DEA, and GA algorithms are compared and analyzed.

Results show that all four algorithms can obtain good convergence, and performance metrics of the RUN algorithm and GA are similar and obviously better than those of PSO and DEA after convergence is achieved. The Analysis of convergence speed shows that the speed decreases with the increase of turbulence level, but the RUN algorithm is significantly faster than other three algorithms. Compared with PSO, DEA, and GA, the convergence speed of the RUN algorithm is about 4.5, 3.3, and 3.5 times faster under $D/r_0=5$, about 3.9, 3.8, and 4.1 times faster under $D/r_0=10$; and about 3.8, 3.4, and 5.3 times faster under $D/r_0=15$, respectively. Additionally, compared with other algorithms, RUN has a lower probability of falling into local extrema which shows the RUN has better convergence stability and better

robustness. Additionally, we also find that the control algorithm is insensitive to parameters and easier to implement.

The RUN optimization algorithm has strong adaptability and fast convergence for aberrated wavefronts correction under different turbulence levels when it is used as a control algorithm of WFSless AO systems. The proposed control method outperforms other classical metaheuristic algorithms and has great application potential in microscopic imaging, spot shaping and other fields. Above research results can provide a theoretical basis for the practical application of wavefront correction systems based on the RUN optimization algorithm.

Key words: Adaptive optics; Control algorithm; RUNge Kutta optimizer; Deformable Mirror; Wavefront correction

OCIS Codes: 110.1080; 010.7060; 220.1000; 140.3300