

文章编号: 0253-2239(2007)09-1628-5

遗传算法在自适应光学系统中的应用

杨 平^{1,2} 许 冰¹ 姜文汉¹ 陈善球¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了校正激光光束的波前像差,建立了一套无需直接探测波前信息的自适应光学(AO)系统模型,提出了一种基于实数编码的高斯变异的遗传算法(GA)用来控制 61 单元压电变形镜补偿波前像差,并仿真利用此算法控制 61 单元变形镜校正由变形镜本身产生的像差。结果表明,这种算法能够找到补偿各种像差所需的变形镜的最优面型。像差校正后,焦平面的峰值光强最多能够提高 30 倍。环围斯特尔比值(Strehl ratio)最多能够从校正前的 0.032 提高到 0.96,变形镜 61 个驱动器后的电压值收敛性能良好。

关键词: 自适应光学; 遗传算法; 变形镜; 峰值光强; 泽尼克多项式

中图分类号: TP202; TP202⁺.7 文献标识码: A

Study of a Genetic Algorithm Used in an Adaptive Optical System

Yang Ping^{1,2} Xu Bing¹ Jiang Wenhan¹ Chen Shanqiu¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)
(² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: For correcting the phase aberration in wavefront, a wavefront sensor-less adaptive optical (AO) system was set up, and a real number encoding Gauss mutation genetic algorithm which was applied to control a 61-channel deformable mirror (DM) was developed. Phase aberration generated by randomly adding voltages to the 61 channels of DM was brought to an ideal incident wavefront. Several simulation experiments have been done. The simulation results demonstrated that this algorithm could find the optimum DM shape which was applied to correct phase aberration. After the phase aberration in incident wavefront was corrected with this technique, the peak light intensity on the focal plane could at most be improved by a factor of 30, and the encircled energy Strehl ratio was increased to 0.96 from 0.032. It is also found that the convergence and stability of the 61 voltages on the DM is quite well.

Key words: adaptive optics; genetic algorithm; deformable mirror; peak intensity; Zernike polynomial

1 引 言

一般的自适应光学系统是利用波前传感器测量像差,得到像差信息后,再经控制系统驱动波前校正器件补偿掉像差^[1]。还有一种较特别的自适应光学系统,在这种系统中,用一个光电探测器件代替波前传感器,以探测器上的光强信号作为判定像差校正情况的标准:当光电探测器上的光强信号最大时,波前校正器对系统像差的补偿就达到最佳。早在 20 余年前,在中国建立的 LF12 激光核聚变装置的波前校正系统就是采用这一原理^[2]。近年来,这种

无波前探测器的自适应光学系统已经成功地应用在校正共焦荧光显微镜系统像差^[3],优化单模光纤系统耦合效率^[4]等领域。虽然这些应用在具体实现上有所不同,但是它们的共同特点都是采用某种优化算法控制校正器件去校正系统中的像差,从而使光电探测器测量到的光强信号达到最大。很多年来,爬山法是这种无波前自适应光学系统中常用的优化方法,但是,由于爬山法寻优时容易陷于局部最优值,还存在 $2\pi N$ 问题等,所以近年来,它逐渐被一些全局搜索算法所代替。遗传算法是一种非常强健的

作者简介: 杨 平(1980—),男,四川江油人,博士研究生,主要从事自适应光学技术方面的研究。

E-mail: pingyang2516@163.com

导师简介: 姜文汉(1936—),男,浙江平湖人,院士,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: adopse@ioe.ac.cn

收稿日期: 2006-05-10; 收到修改稿日期: 2006-10-10

全局寻优算法,理论研究表明只要参量选择得当,遗传算法总能以 100% 的概率找到问题的最优值。本文在简要介绍遗传算法原理的基础上,提出了一种实数编码的高斯变异的遗传算法(GA),仿真利用此算法控制 61 单元变形镜校正由变形镜本身产生的由前 35 阶泽尼克多项式表述的像差,并且对像差校正效果以及这种遗传算法的收敛性进行了研究。

2 遗传算法控制的无波前探测器的自适应光学系统

2.1 典型的无波前探测器的自适应光学系统

图 1 是无波前探测器的自适应光学系统的示意图。带有像差的激光波前入射到变形镜(波前校正器)上,经变形镜反射后再由聚焦透镜把激光波前聚焦在透镜的焦平面上,一个孔径非常小的针孔设置在焦平面上,针孔后的光电探测器测量透过针孔的波前光强大小。遗传算法以这个光强信号作适应度函数,控制变形镜向着使适应度函数增大的方向产生相应的形变,补偿掉入射波前的像差。当光强信号达到最大的时候,入射波前的像差得到最大补偿。设入射波前相位为 $W_1(r, \theta)$, 经过变形镜产生的补偿波前相位为 $W_2(r, \theta)$, r, θ 是透镜物平面上的极坐标,为了处理问题方便,把物平面半径归一化为 1。

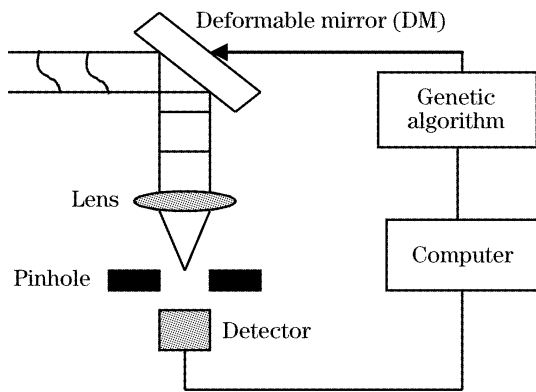


图 1 无波前传感器的自适应光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of the adaptive optical system without wavefront sensor

根据傅里叶衍射理论,光电探测器上的光强信号可以表示为

$$F = I_0 \left| \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{1}{\pi} \exp[jW_1(r, \theta) - jW_2(r, \theta)] r dr d\theta \right|^2, \tag{1}$$

其中 I_0 是个与入射光功率成正比的量。设 A 是用来表述待补偿波前的各阶泽尼克多项式的系数, B 是变形镜产生的波前的泽尼克多项式的系数。 $A =$

$(A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_n)$, $B = (B_1, B_2, \dots, B_k, \dots, B_n)$, 则有

$$W_1(r, \theta) = A * Z_k(r, \theta), \tag{2}$$

$$W_2(r, \theta) = B * Z_k(r, \theta), \tag{3}$$

令 $C = A - B$, 则

$$F(C) = I_0 \left| \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{1}{\pi} \exp\left[j \sum_{k=1}^n c_k Z_k(r, \theta)\right] r dr d\theta \right|^2, \tag{2}$$

I_0 是与入射光的功率成正比的量,由于泽尼克多项式具有正交性,当 $|C|$ 非常小,由泰勒展开定理有

$$\begin{aligned} F(C) &\approx I_0 * \exp(j|C|) \approx \\ &I_0 * (1 + |C|)^2 \approx \\ &I_0 * (1 + 2j|C| - |C|^2) \approx \\ &I_0 * (1 - |C|^2), \end{aligned} \tag{5}$$

由(5)式可知,当像差补偿的很好时候, C 非常小, $F(C)$ 非常大,也即焦面上小孔后的光强信号非常大,最理想的情况是 $|C| = 0$, 此时,入射波前的像差得到全部补偿。

2.2 遗传算法及其在 61 单元自适应光学系统的应用

遗传算法是一种非常强健的优化方法,它特别适合用来寻找复杂的多目标问题的全局最优解。图 2 是这种算法的流程图,可见算法执行可分解为以下几个步骤:1)初始化种群,2)对种群中个体的编码操作,3)个体的适应度函数计算,4)个体的选择操作,5)个体间的交叉和变异操作,6)算法中止判定条件。其中,种群由一定数量的个体组成,每个个体对应于实

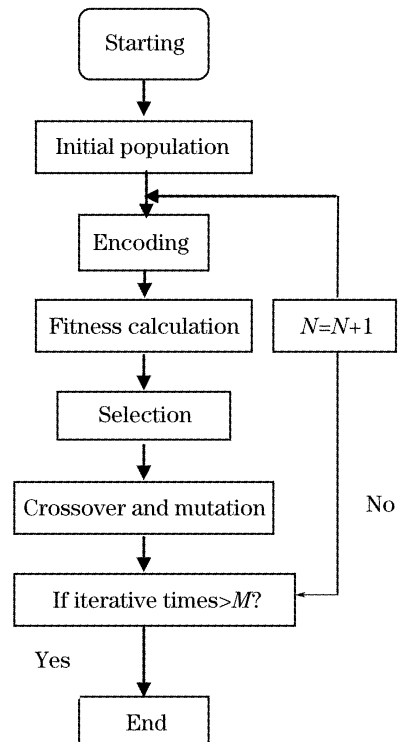


图 2 遗传算法执行的基本流程图

Fig. 2 Flow Chart of this genetic algorithm (GA)

实际问题的一个可能解,个体可以通过二进制编码,也可以通过实数编码,编码后的个体称之为染色体。编码后,计算每个个体的适应度,适应度是用来衡量种群中每个个体可能达到或接近于最优解的优良程度。在求解最大值的系统中,适应度越大的个体被选出参与后期交叉操作与变异操作的概率就越大。遗传算法经过以上 6 个步骤执行一次,就会产生一个新的种群,每一个新的种群称为一代。遗传算法不断迭代执行以上 6 个步骤,直到算法中止条件满足,此时,找到的个体就是对应问题最优解的个体。

以下将阐述如何把遗传算法应用在 61 单元自适应光学系统中。61 单元变形镜靠加在变形镜背后的 61 个驱动器上的电压驱动镜面产生变形以改变入射到镜面的波前相位。61 单元变形镜布局如图 3 所示,每个黑点代表一个驱动器单元。设每个驱动器上可加电压的范围为 $[-200 \text{ V}, 200 \text{ V}]$,如果电压的变化步长为 1V,则 61 个驱动器可以产生 400^{61} 也即约 10^{160} 个不同的电压组合,每个电压组合对应于变形镜的一个面形。在 61 单元自适应光学系统运用遗传算法控制变形镜的目的就是要在这一 10^{160} 个面形中找到一个最佳面形,使该面形产生的波前能最大程度的补偿掉入射波前的像差。算法具体实现如下:1)首先随机产生由一定数量个体组成的初始种群,每个个体对应于一个变形镜面形,采用实数编码的方式,即直接利用这 61 个电压值作为编码后个体对应的染色体的一个基因值,如 $[V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_{61}]$ 为某个个体编码后对应的染色体,则 $V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_{61}$ 这 61 个电压分别是染色体的一个基因值。2)对种群中的个体编码后,就要计算个体的适应度,由 2.1 节分析可知,把小孔后的光强信号作为遗传算法的适应度函数是可行的,即把(5)式表示的 $F(C)$ 作为遗传算法的适应度函数。3)根据适应度函数的大小,进行选择操作,本文采用最优保

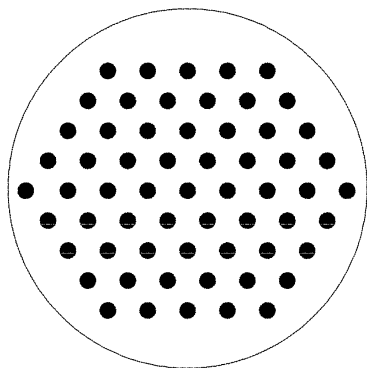


图 3 61 单元变形镜的布局图

Fig. 3 Configuration of 61-element DM

留策略的比例选择方法,其基本思想是某代种群中各个个体被选中进入到下一代的概率与其适应度大小成正比,前一代种群中适应度最大的个体不参与后期的交叉和变异,直接保留下来进入下一代。设种群大小为 M ,个体 k 的适应度为 $F_k(C)$,则个体 k 被选中的概率 P_k 为

$$P_k = F_k(C) / \left[\sum_{k=1}^M F_k(C) \right], \quad (6)$$

$$(k = 1, 2, \dots, M)$$

根据这个概率进行轮盘选择,概率越大,被选择的可能性也就越大,以此准则确定出被选中的个体。4)对选择后的个体进行交叉和变异操作,交叉和变异可以说是遗传算法的核心部分,交叉操作决定算法的全局搜索性能,变异操作决定算法的局部搜索能力,所以,交叉算子和变异算子的选择非常重要。本文采取均匀算术交叉算子和高斯变异算子。均匀交叉算子思想如下:设按照交叉率 P_C 从种群中选择出的要进行算术交叉的两个个体分别为 Y_M^i, Y_N^i ,则交叉后产生的两个新个体 Y_M^{i+1}, Y_N^{i+1} 分别为

$$Y_M^{i+1} = A * Y_N^i + B * Y_M^i, \quad (7)$$

$$Y_N^{i+1} = A * Y_M^i + B * Y_N^i, \quad (8)$$

式中, $0 < A < 1, 0 < B < 1$ 且 $A + B = 1$ 。

高斯变异操作是指进行变异操作时,用符合均值为 μ ,方差为 σ^2 的正态分布的一个随机数来替换按变异概率 P_m 选择的个体对应的基因值。具体实现高斯变异时,符合正态分布的随机数 R 可由一些符合均匀分布的随机数利用公式来近似产生。假定有 20 个在 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数 $r_i (i = 1, 2, \dots, 20)$,则符合 $N(\mu, \sigma^2)$ 正态分布的一个随机数 R 可由下式求得:

$$R = \mu + \sigma \left(\sum_{i=1}^{20} r_i - 10 \right), \quad (9)$$

本文中,设 61 单元变形镜某个面形对应的个体为 $V = [V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_{61}]$,若 V_k 为变异点,其取值范围为 $[U_{\min}^k, U_{\max}^k]$,在该点对个体 V 进行高斯变异操作,令 $\mu = \frac{U_{\min}^k + U_{\max}^k}{2}, \sigma = \frac{U_{\max}^k - U_{\min}^k}{10}$,则个体 $V = [V_1, V_2, \dots, V_k', \dots, V_{61}]$ 的新基因值 V_k' 为

$$V_k' = \frac{U_{\min}^k + U_{\max}^k}{2} + \frac{U_{\max}^k - U_{\min}^k}{10} \left(\sum_{i=1}^{20} r_i - 10 \right). \quad (10)$$

3 仿真结果与分析

根据 2.1 节和 2.2 节阐述的方法和步骤,把高

斯变异遗传算法应用在了 61 单元自适应光学系统中,并进行仿真计算。以迭代次数作为算法的终止判断条件,当达到迭代次数时,程序停止运行,此时,找到的个体就是最佳个体。初始种群数包含 30 个个体,交叉率 P_c 设为 0.7, 变异率 P_m 设为 0.05。如(2)式所示,仿真时,待补偿的波前像差 $W_1(r, \theta)$ 用 61 单元变形镜随机产生,由圆域内的前 35 阶泽尼克多项式表征^[5]。仿真时,把变形镜产生的波前像差 $W_1(r, \theta)$ 经傅里叶变换(相当于图 1 中透镜的作用)会聚在远场焦平面。在仿真程序中,通过软件把针孔的口径设置为和入射波前的远场艾里斑一样大。仿真系统的变形镜的驱动器间距为 16.4, 通光孔半径为 60。仿真系统取归一化的 100×100 的网格点。驱动器影响函数为

$$f(r) = \exp[\ln(C_m)(|r|/r_0)^a]^{[6]}, \quad (11)$$

(11) 式中, r_0 为驱动器间距,取 $a = 2, C_m = 0.25$ 。

把通过针孔后的光强强度之和 $F(C)$ 作为高斯变异遗传算法的适应度函数, $F(C)$ 越大,波前像差补偿得就越好,焦斑的能量就会越集中,通过焦斑中

心针孔的光强之和就越大。经过 1000 次迭代运行后,遗传算法基本收敛。图 4(a)是像差校正前的近场波面,图 4(b)是像差校正后的近场残差波面,波面峰谷值(PV)和均方根值(RMS)分别由校正像差前的 3.758λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 和 0.245λ 降低为 0.623λ 和 0.062λ 。图 5 分别是像差校正前后远场光斑强度分布图。校正后,远场焦斑峰值光强提高了 30 倍。图 6 是理想平面波前,带像差波前,高斯变异遗传算法控制变形镜校正像差后光束波前的远场环围能量斯特尔(Strehl)比曲线,由图 6 中的虚线可知,在像差校正后光束波前的斯特尔比曲线非常接近理想波前的比值曲线,一倍衍射极限内的能量可以达到总能量的 81%,可见校正效果非常好。图 7 是高斯变异遗传算法运行过程中,各代种群中适应度最大的个体的归一化适应度曲线。可见,采用最优保存策略选择算子,可以使适应度函数单调增长,直到最后达到能达到收敛,该值对应的个体就是最优的镜面面型。

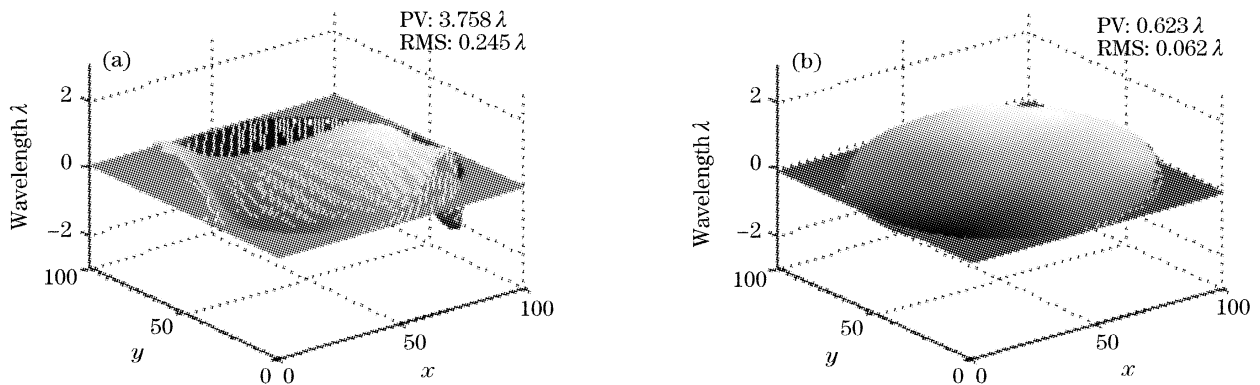


图 4 自适应光学系统的校正效果。(a)像差被校正前光波的近场相位分布,(b)像差被校正后光波的近场相位分布

Fig. 4 Compensation performance of the adaptive optical system controlled by GA. (a) Near-field phase distribution before correction, (b) near-field phase distribution after correction

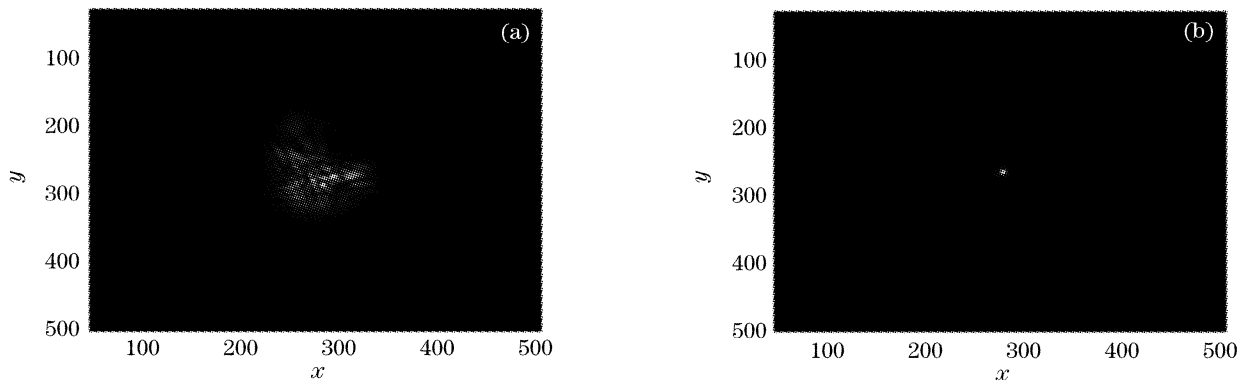


图 5 像差校正前后远场光强的分布图。(a) 校正前,斯特尔比为 0.032,(b)校正后斯特尔比为 0.96

Fig. 5 Comparisons of the far-field light intensity distribution. (a) Before correction, the Strehl ratio is 0.032, (b) after correction, the Strehl ratio is 0.96

设产生波前像差的变形镜驱动器上的电压为 V_1 , 补偿该像差时变形镜驱动器上施加的校正电压

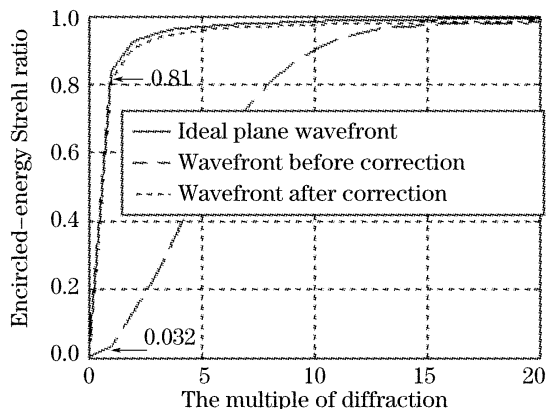


图 6 远场环围能量曲线图

Fig. 6 Far-field encircled energy Strehl ratio curves

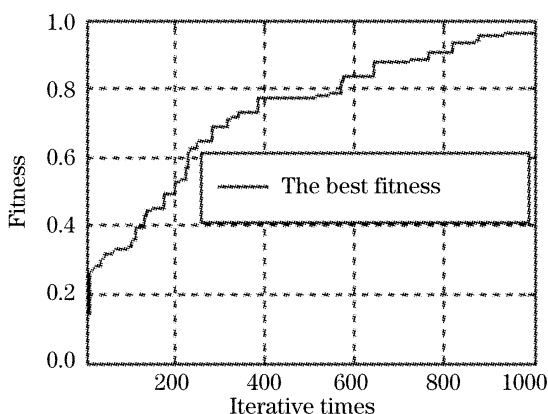


图 7 遗传算法在搜索运行过程中从各代找到的归一化最佳适应度值

Fig. 7 Best normalized fitness of each generation during searching process

为 V_2 。 V_1, V_2 都是 61 维向量。通过比较 V_1, V_2 的差值 V_3 去度量变形镜 61 个驱动器上的电压值的收敛情况,再利用 V_3 收敛情况去检验遗传算法的收敛性。校正像差后, V_3 越小越集中,遗传算法的收敛性就越好。由图 8 可见,随着迭代次数增多, V_3 由发散逐渐收敛到一个稳定的区域。校正像差前, V_3 的值分布在 $[-3, 3]$ 之间,且起伏较大,没有规

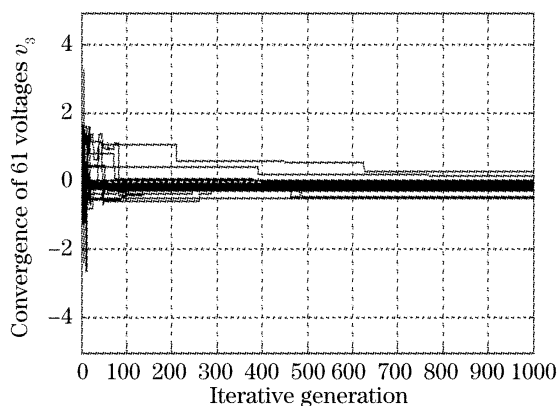


图 8 变形镜上 61 个驱动器电压的收敛性能图

Fig. 8 Convergence of 61 voltages behind the DM

4 结 论

在不测量波前像差的条件下,经过 1000 次迭代运行后,利用高斯变异遗传算法可以找到变形镜校正波前像差的最佳面形。校正像差后,激光波前在远场焦斑上的峰值光强和焦斑能量集中度都大有提高,该算法的收敛性很好。需要指出的是,仿真时,由于算法最耗时的部分在于(适应度函数)远场焦斑光强的计算,所以算法快速性不是很好,在实际系统中,大多直接利用光电探测器探测焦斑光强,这可能会节约程序执行时间,提高算法的快速性。为了把该算法更加有效的运用在实际的 61 单元自适应光学系统中,还需要进一步研究遗传算法的机理,设计出更为有效的遗传操作算子,以及更合理的适应度函数,提高算法速度,以便在利用遗传算法的全局寻优能力的同时,更好的满足系统的实时性要求。

参 考 文 献

- Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1236~1240 (in Chinese)
李新阳,姜文汉. 哈特曼-夏克波前传感器的泽尼克模式复原误差[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1236~1240
- Hu Bian, Rao Changhui. The application of incremental wiener filters in image deconvolution of wavefront sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1305~1309 (in Chinese)
胡 边,饶长辉. 增量维纳滤波法在波前探测解卷积中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1305~1309
- Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. A small adaptive optical imaging system for cells of living human retina[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1153~1158 (in Chinese)
凌 宁,张雨东,饶学军等. 用于活体人视网膜观察的自适应光学成像系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1153~1158
- Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Data fusion of the two Hartman-Shack wavefront sensors in the common path/common mode adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 131~136 (in Chinese)
侯 静,姜文汉,凌 宁. 共光路/共模块自适应光学数据融合算法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 131~136
- Jiang Wenhan, Huang Shufu, Wu Xubing. Hill-climbing adaptive optics wavefront correction system[J]. *Chin. J. Lasers*, 1988, **15**(1): 17~21 (in Chinese)
姜文汉,黄树辅,吴斌旭. 爬山法自适应光学波前校正系统[J]. *中国激光*, 1988, **15**(1): 17~21
- M. J. Booth, M. A. A. Neil, R. Juskaitis *et al.*. Adaptive aberration correction in a confocal microscope[J]. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2002, **99**(9): 5788~5792
- A. C. F. Gonte, R. Dandliker. Optimization of single-mode fiber coupling efficiency with an adaptive membrane mirror[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(5): 1073~1076
- Ping Yang, Shijie Hu, Xiaodong Yang *et al.*. Test and analysis of the time and space characteristics of phase aberration in a diode-side-pumped Nd:YAG laser[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **6108**: 182~191
- Shao Li, Xian Hao. Influence of deformable mirror parameter variation on aberration correction for atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(5): 7~10 (in Chinese)
邵 力,鲜 浩. 变形镜参数变化对湍流像差校正效果的影响[J]. *光电工程*, 2004, **31**(5): 7~10