

文章编号: 1001-3806(2008)06-0635-04

基于微机械薄膜变形镜的闭环实时模式复原

童 桂, 廖文和*, 梁 春

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘要: 为了解基于微机械薄膜变形镜自适应光学系统的最优模式控制电压, 以使系统的入射畸变波前像差降到最小, 采用了一种基于改进的奇异值分解闭环实时模式复原算法, 可通过调整控制参量 g_1 , g_0 和 W 来优化波前复原的复原精度和收敛速度; 采用一人眼出射畸变波前像差作为自适应光学系统的原始波前, 与现有的几种实时模式复原算法相比, 其在收敛速度和复原精度上都有所改善。结果表明, 基于改进的奇异值分解闭环实时模式复原算法, 在一定程度上解决了微机械薄膜变形镜由于薄膜面型宽交连值、驱动电极单调但非线性的控制电压求解问题, 算法可调整空间大、适用范围也较广。

关键词: 物理光学; 闭环实时; 微机械薄膜变形镜; 模式复原

中图分类号: O436 文献标识码: A

Close-loop real time modal reconstruction of wavefront based on MMDM

TONG Gui, LIAO Wen-he, LIANG Chun

(College of Mechanical & Electrical Engineering Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract An close-loop real-time algorithm of improvement singular value decomposition(SVD) modal reconstruction of wavefront was introduced in order to solve the optimal control voltages of adaptive optics based on the micromachined membrane deformable mirror(MMDM) and reduce the incident wavefront aberration to the minimum. By adjusting the control parameters such as g_1 , g_0 and W , reconstruction precision and convergence speed of wavefront were optimized. Wavefront aberration from the human eye was introduced as the incident wavefront of adaptive optics and the reconstruction precision and convergence speed were improved by comparing the existent algorithms of wavefront reconstruction. As a result, the close-loop real-time algorithm of the improved SVD to some extent settled the control voltages of MMDM, which has the characteristic of great intercourse membrane and monotony but nonlinear driving electrode. This algorithm has good application and flexibility.

Key words physics optics; close-loop real-time micromachined membrane deformable mirror modal reconstruction

引 言

变形镜在自适应光学系统中用于对入射畸变波前进行相位校正, 使得入射波前相位分布接近理想的平面(或球面)形式, 从而改善成像系统和光束传输过程中的光学质量^[1-2]。随着微机电加工技术不断发展进步, 一些新型的变形镜陆续得到研制和应用, 其中微机械薄膜变形镜(micromachined membrane deformable mirror MMDM)因为具备体积小、成本低、能耗低、响应快及集成度高等传统自适应光学系统变形镜不具备的优势, 并且可采用标准化工艺大批量生产, 其在天文、

航天、光通信、高精度测距、遥感、强激光、医疗仪器等众多领域都有潜在的应用前景^[3-4]。然而MMDM在具有上述优点的同时, 也存在其它波前校正器不具备的缺点, 其中包括了MMDM因其镜面面型无约束支撑和单向形变, 驱动电极的镜面变形耦合更严重, 并且由于驱动电极与导电薄膜之间的力电效应随两者之间的距离改变而成非线性变化, 综合多种因素, 制约了该波前校正器的波前校正能力, 在实际的波前控制中易出现控制电压“饱和”等难以克服的缺陷, 因此, 基于MMDM的波前复原控制算法也更加复杂。畸变波前模式复原即采用一组基函数去拟合入射畸变波前像差, 常采用的正交基函数包括Zemike多项式、Seidel多项式等, 其中基于Zemike多项式的模式复原算法在光学工程领域的应用较为普遍^[5-8]。合适的波前控制算法有利于MMDM波前复原的准确和稳定, 本文中针对MMDM的特点, 在波前模式控制算法中应用改进的奇异值闭环实时模式复原算法, 对波前像差不断修正, 从

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2006AA020804)

作者简介: 童 桂 (1978-), 男, 博士研究生, 主要从事生物医学和自适应光学方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: cnwho@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2007-07-24 收到修改稿日期: 2008-01-10

而在可行域范围内获得波前复原的最优控制电压。该方法为克服控制电压的“饱和”问题提供了一个有效的解决途径。

1 微机械薄膜变形镜

对于静电驱动的 MMDM, 具体结构特征和材料力学属性已有科研工作者做了充分的研究^[9,12]。MMDM 影响函数表征了电极驱动电压和面型形变之间的对应关系: $F_i(x, y) \propto V_i$ 。文献[9]~文献[11]中详细分析了 MMDM 第 i 个电极驱动电压 V_i 和波前改变量之间的相互关系, 并指出: 波前改变量和驱动电极控制电压的平方之间存在准线性关系, 即满足:

$$\sum_i F_i(x, y) V_i^2 \propto K a \quad (1)$$

式中, V_i 为第 i 个控制电极的电压值; $F_i(x, y)$ 为第 i 个驱动电极的影响函数模式向量; $a = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ 为入射畸变波前的 Zernike 多项式像差模式系数, K 为增益因子。在满足一定条件下, 令 $K = 1$, 则 (1) 式满足:

$$\sum_i F_i(x, y) V_i^2 = a \quad (2)$$

由于基于波前传感器的模式复原结果可表示为:

$$\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^m a_j Z_j(x, y) + \varepsilon_s \quad (3)$$

式中, $\varphi(x, y)$ 为入射畸变波前; ε_s 为基于波前传感器的拟合残余误差。上述可简化成矩阵表示形式, 即: $FV = a$, 其中 $V = [V_1^2, V_2^2, \dots, V_n^2]$ 。

MMDM 影响函数反映了单个电极电压变化和变形镜面型形变量之间的相互关系, 工程上 MMDM 影响函数通常由光学波前检测设备测量获得, 因此影响函数的测量也与实际波前测量设备相关, 测量设备越精确, MMDM 影响函数的标定越准确。

基于 Zernike 多项式模式复原算法为:

$$\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^m a_j Z_j(x, y) + \varepsilon_s = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m c_{ik} Z_{ik}(x, y) V_i^2 + \varepsilon_d + \varepsilon_s \quad (4)$$

式中, c_{ik} 为第 i 个驱动电极的第 k 项 Zernike 模式系数; ε_d 为 MMDM 的波前复原误差。

现有的基于 MMDM 的模式复原方法包括直接和闭环迭代两种基本方法。直接法求解 MMDM 模式复原控制电压由于受到 MMDM 非线性控制特性的影响, 一般情况下很难直接获得最优控制电压, 工程上常采用闭环实时复原算法从而逐步收敛到变形镜最优复原控制电压。闭环实时模式复原算法可以针对 MMDM 复原校正残差加以分析和修正, 从而得到合适的控制

参量, 使得入射波前畸变达到最小。JIANG 等人^[13]利用最速下降法提出了一种闭环实时模式复原算法, 在模式控制中增加一模式收敛控制参量, 优化低阶和高阶模式像差不同的收敛速度, 此种算法可以对波前校正器的模式校正能力有限提供了一种解决途径。LI 和 ZHU 等人^[14,15]也针对薄膜变形镜的模式控制问题提出了一种基于奇异值分解实时模式复原算法。然而此时其并没有考虑到 MMDM 的模式控制特点, 收敛速度和复原精度不高。笔者结合上述两种方法, 针对 MMDM 的控制电压非线性及校正波前模式范围有限, 且易出现“饱和”的控制复原问题, 提出了一种基于改进的奇异值分解闭环波前模式控制算法, 在考虑到收敛速度的同时, 也对具体涉及的 Zernike 复原模式加以分析, 避免了模式复原系统的震荡不稳定, 且分别给定了总体收敛参量 g_1 和收敛参量 g_0 , 用于优化模式复原的具体过程。

2 基于奇异值分解的闭环实时模式复原算法

基于 MMDM 闭环实时模式复原原理见图 1, 其中

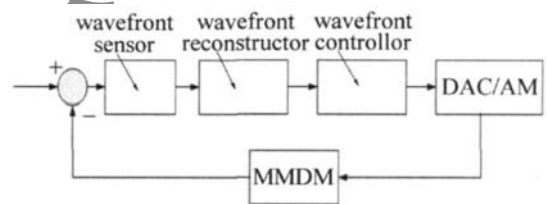


Fig 1 The principle of close loop control based on the MMDM

波前传感器检测入射的畸变波前像差, 经过波前重建计算得到波前的 Zernike 模式系数, 再通过波前控制算法得到波前校正控制电压, 将控制电压通过数模转换器 (digital analog converter, DAC) 和电压放大器 (voltage amplifier, AM) 后输送到 MMDM 控制电极, 从而产生减小波前像差的面型形变。

基于 MMDM 的模式复原算法可由矩阵表示: $\varphi =$

$$FV + \varepsilon_s, \text{ 要求 } \varepsilon_d \text{ 的 } l_1 \text{ 范数 } \|\varepsilon_d\| \rightarrow 0, \text{ 则 } \frac{\partial \varepsilon_d}{\partial V} = -F.$$

则推出波前像差复原控制电极的电压值为:

$$V^{k+1} = V^k - F^+ (a^k - a_e) \quad (5)$$

式中, V^k 为第 k 次 MMDM 控制电极的电压值; a^k 为第 k 次波前复原的 Zernike 模式系数; a_e 为预期的理想波前模式系数; F^+ 为基于奇异值分解的广义逆矩阵, 即 $F^+ = V \Sigma^{-1} U^T$, $U^T U = I \in R^{n \times m}$, $V^T V = I \in R^{n \times n}$ 。增加控制参量 $g_1 \in [0, 1]$ 调节模式复原整体收敛速度, 于是控制电压闭环迭代求解公式为:

$$V^{k+1} = V^k - g_1 \cdot F^+ (a^k - a_e) \quad (6)$$

由于 Zernike 多项式的空间分辨率各异, 低阶模式空间变化较平滑, 高阶模式空间变化较剧烈, 而 MMDM 存

在宽交连值、驱动电极之间面型耦合严重的特征, 闭环控制算法中增加模式收敛控制参量 g_0 , 控制参量 g_0 有助于入射畸变模式像差的低阶模式项。于是 (6) 式进一步推导为:

$$V^{k+1} = V^k - g_1 \cdot F^+ (a^k - a_e) \cdot g_0 \quad (7)$$

$g_0 = [\theta_0, \theta_2, \dots, \theta_m]$, 用于分别控制各阶模式收敛速度。对于 g_0 的选取, 可针对 Zernike 模式像差均方根下降方向作为依据^[15], 即:

$$\sigma_{z_i} = \frac{1}{S} \iint_S |a_i Z_i(x, y)|^2 dx dy = \|a_i \times w_{z_i}\|^2 \quad (8)$$

式中, $g_0 = [\theta_0, \theta_2, \dots, \theta_m] = [w_{z_1}, w_{z_2}, \dots, w_{z_m}]$ 表征了各阶 Zernike 模式像差在单位圆 S 上的均方根值, 且:

$$w_{z_i}^2 = \int_S |Z_i(x, y)|^2 dS$$

为进一步提高 MMDM 波前模式实时校正的稳定性, 对波前校正器影响函数进行奇异值分解 (singular value decomposition, SVD), 即: $F = U \Sigma V^T$, 其中 $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n$ 。定义阈值为 η , 分别计算 $\sigma_i / \sigma_1 > \eta$, $i = 1, 2, \dots, n$, 如果成立, 将 σ_i 置 0, 相反则保持 σ_i 不变。经过复原模式优化处理, MMDM 对于难以控制复原组合的像差模式做了适当滤除, 这样有利于 MMDM 实时校正的稳定。建立影响函数正交模式组合优选控制矩阵 $W \in R^{m \times n}$, 最终基于 MMDM 的闭环实时模式控制复原算法可定义为:

$$V^{k+1} = V^k - g_1 \cdot V \Sigma^{-1} U^T \cdot W \cdot (a^k - a_e) \cdot g_0 \quad (9)$$

因为 (9) 式有多个控制参量可以调节波前模式复原的收敛速度和控制精度, 算法适应度大, 调整灵活, 适用于 MMDM 的波前复原问题。

3 仿真和结果分析

在控制电压本身受限的情况下, 即 $V_i \in [b, c]$, $i = 1, 2, \dots, n$, 直接法求解变形镜的最优模式电压不再可用, 则问题转变为在可行域内 $V_i \in [b, c]$ 求解 $r = \|a - FV\|_2$ 达到最小值的最优控制电压, 于是利用闭环迭代求解变形镜的模式复原控制电压。

实时模式复原算法优劣对于波前的控制性能主要体现在: (1) 收敛速度。控制收敛速度越快, 对于动态波前像差的控制越好; (2) 控制精度。主要表现在复原模式残差越小越好。针对 JIANG 等人^[13] 提出了闭环波前控制算法, 利用本文中模式复原算法加以比较分析。

MMDM 电压量程范围有限和单向面型变化情况下, 设变形镜的电压变化范围 $V_i \in [b, c]$, 如果当迭代过程中出现超出电压范围的情形, 则就以控制电压极限值进行替换。

为强调 MMDM 的应用价值, 采用一人眼出射畸变

波前像差作为自适应光学系统的原始波前输入, 定义模式系数向量 $a = [a_0, a_1, \dots, a_{35}]$, 其中整体平移量和倾斜量 a_0, a_1, a_2 由于不影响光学系统的成像质量, 一般不在考虑范围内。几种闭环控制算法性能比较结果见图 2。

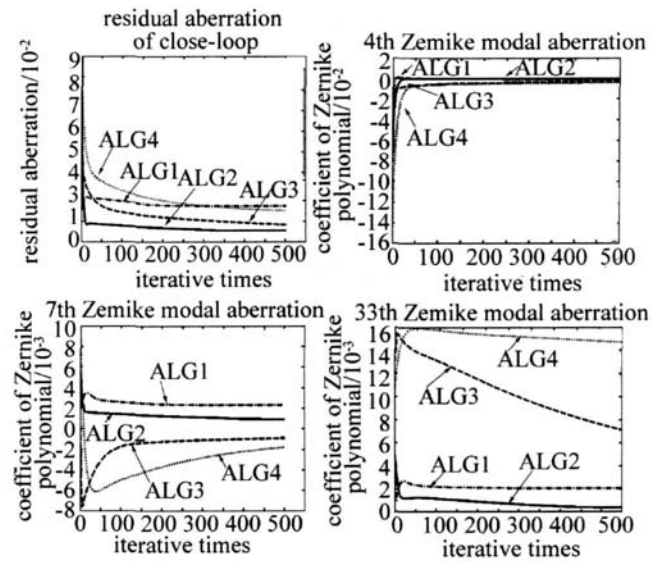


Fig 2 Comparison of the algorithms ALG 1—SVD close loop control including g_1 ; ALG 2—SVD control including g_1 and g_0 ; ALG 3—close loop control^[12]; ALG 4—close loop control^[13]

表 1 描述了 n 次迭代后模式复原残余像差的均方根值, 即 $\sigma_{RMS} = \frac{1}{S} \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2}$, a_i 为残余 Zernike 波前像差模式系数。

Table 1 Results of the algorithms of wavefront control

iterative times n	algorithms			
	ALG 1	ALG 2	ALG 3	ALG 4
1	0.089698	0.089698	0.089698	0.089698
10	0.021714	0.0096433	0.028614	0.049163
100	0.019467	0.0076478	0.014138	0.024633
500	0.01716	0.005428	0.008115	0.014936

从图 2 和表 1 可知, 其中基于改进的 SVD 实时模式复原算法 (算法 2) 在收敛速度和复原精度上都好于其它几种方法。基于改进的 SVD 闭环控制算法在迭代 10 次之后 $\sigma_{RMS} < 0.01\lambda$ 收敛速度较其它闭环控制算法优越, 表明此种算法有良好的动态实时校正性能。利用改进算法在闭环迭代 500 次时, 残余波前像差已小于 0.0055λ 有先“快”后“慢”的良好稳定性。

4 小结

根据 MMDM 驱动电极之间面型耦合严重、且只能单向变形的结构和性能特征等多种不利因素, 提出了改进的奇异值分解波前闭环实时模式复原算法, 在闭

环控制过程中增加了整体收敛速度控制参量 g_1 , 模式控制参量 g_0 和模式优选参量 W 。对于高阶模式像差, 变形镜的复原控制电压可能无法在可行域保证其能被准确校正, 于是闭环控制过程可能因此变得不稳定, 在此情形下, 适当对变形镜影响函数进行统计分析, 剔除其中易影响波前复原精度的模式组合, 从而提高了 MMDM 工作过程的准确度和稳定性。由于 MMDM 其影响函数控制矩阵的测量存在很多非线性因素^[9], 模式控制的最优控制电压不能简单地通过直接法求解, 于是通过波前复原闭环控制逐步减小入射畸变的残余像差, 在工程上具有一定的实用价值, 有助于 MMDM 在自适应光学领域的推广和应用。

参 考 文 献

- [1] ZHOU R Zh. Adaptive optics [M]. Beijing National Defence Industry Press 1996 1-50 (in Chinese).
- [2] VDOVN G, M IDELHOEK S, SARRO P M. Technology and application of micromachined silicon adaptive mirrors [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering 1999, 9(2): 8-20.
- [3] DOBLE N, WILLIAM D. The application of MEMS technology for adaptive optics in vision science [J]. Selected Topics JQE, 2004, 10(3): 629-635.
- [4] CHEN J, CHEN H Q. Experiments and tests of micro adaptive optics system based on MMDM [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2006, 34(9): 60-62 (in Chinese).
- [5] PERRAULT JA, BFANO T G, LEV NE B M, *et al*. Adaptive optic correction using microelectromechanical deformable mirror [J]. Opt Engng 2002, 41(3): 561-566.
- [6] JIANG Y S, WANG S, ZHAO D Z, *et al*. A algorithm for wavefront reconstruction of micromachined adaptive optical system [J]. Optical Technique 2001, 27(3): 220-222 (in Chinese).
- [7] VDOVN G. Optimization-based operation of micromachined deformable mirrors [J]. Proc SPIE, 1998, 3353: 902-909.
- [8] DAYTON D C, MANSELL J D, GONGLEW SK I J D. Novel micromachined membrane mirror characterization and closed loop demonstration [J]. Opt Commun, 2001, 200: 99-106.
- [9] TONG G, LIAO W H, LIANG Ch. Modal reconstruction of continuous membrane mirrors based on the simulated annealing [J]. Laser Technology 2008, 32(5): 517-520 (in Chinese).
- [10] LIE D, DUAN H F, DAI Y, *et al*. Analysis of characteristics of micromachined membrane deformable mirror [J]. High Power Laser and Particle Beams 2006, 18(7): 1099-1104 (in Chinese).
- [11] FANG D, CHEN H Q, LI J *et al*. The measurement of some important parameters of micromachined deformable mirror [J]. Optical Instruments 2005, 27(3): 21-27 (in Chinese).
- [12] CHEN K, ZHAO D Z, YU X. Measurement and study for optical influence function matrix of micromachined membrane deformable mirrors [J]. High Technology Letters 2000(9): 22-26 (in Chinese).
- [13] JIANG Y S, WANG S, ZHAO D Z, *et al*. A algorithm of closed loop control of micromachined adaptive optical system [J]. Optical Technique 2001, 27(3): 211-213 (in Chinese).
- [14] LIX X, WANG Ch H, XIAN H, *et al*. Real time modal reconstruction algorithm for adaptive optics systems [J]. High Power Laser and Particle Beams 2002, 14(1): 1-4 (in Chinese).
- [15] ZHU J, SUN P, BARTSCH D, *et al*. Wavefront generation of Zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror [J]. Appl Opt 1999, 38(28): 6019-6026.
- (上接第 613 页)
- 光学厚度几乎保持为常数。对米散射激光雷达实际测量到的云粒子数据进行反演, 计算结果表明, 修正前后卷云的后向散射系数几乎不受多次散射的影响, 进行了多次散射修正的消光系数要比未修正时近似高 2 倍。而对于低空水云, 多次散射的影响相对较小。
- 参 考 文 献
- [1] QIU J H, ZHENG S P, HUANG Q R, *et al*. Lidar measurements of cloud and aerosol in the upper troposphere in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences 2003, 27(1): 1-7 (in Chinese).
- [2] PAL S R, CARSWELL A I. Multiple scattering in atmosphere clouds: lidar observations [J]. Appl Opt 1976, 15(8): 1990-1995.
- [3] ELORANTA E W. Calculation of doubly scattered lidar returns [D]. Madison Wisconsin in University of Wisconsin, 1972: 8-23.
- [4] PLATT C M R, WINKER D M. Multiple scattering effects in clouds observed from LITE [J]. Proc SPIE, 1995, 2580: 60-71.
- [5] PLATT C M R. Remote sensing of high clouds III: Monte Carlo calculations of multiple-scattered lidar returns [J]. Journal of the Atmospheric Sciences 1981, 38(1): 156-157.
- [6] ELORANTA E W. Practical model for the calculation of multiply scattered lidar returns [J]. Appl Opt 1998, 37(12): 2464-2472.
- [7] BISSONNETTE L R, BRUSCAGLIONI P, SMAELLI A, *et al*. Lidar multiple scattering from clouds [J]. Appl Phys 1995, B60(4): 355-362.
- [8] BRUSCAGLIONI P, FLESIA C, SMAELLI A, *et al*. Multiple scattering and lidar returns [J]. Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society, 1998, A7(6): 1273-1287.
- [9] YOUNG S A. Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin clouds [J]. Appl Opt 1995, 34(30): 7019-7031.
- [10] WADADA W, KINJO H, KUZEH, *et al*. Effect of multiple scattering in the lidar measurement of troposphere aerosol extinction profiles [J]. Optical Review, 2001, 8(5): 382-387.
- [11] WINKER D M, POOLE L R. Monte Carlo calculations of cloud returns for ground-based and space-based lidars [J]. Appl Phys 1995, B60(4): 341-344.
- [12] YOU Y, KATTAWAR GW, YANG P, *et al*. Sensitivity of depolarized lidar signals to cloud and aerosol particle properties [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2006, 100(1/3): 470-482.
- [13] HESSM, WEGNER M. COP: a data library of optical properties of hexagonal ice crystals [J]. Appl Opt 1994, 33(33): 7740-7746.
- [14] WARREN S G. Optical constants of ice from ultraviolet to the microwave [J]. Appl Opt 1984, 23(8): 1206-1225.