

文章编号: 1002-1582(2005)02-0196-04

液晶空间光调制器相位调制测量及波前校正^{*}

王治华, 俞信

(北京理工大学 信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

摘 要: 提供了一种简单且精度较好的测量液晶空间光调制器相位调制特性的方法, 即相位与电压(灰度)之间的关系。采用数字波面移相干涉仪, 由干涉仪直接给出不同灰度对应的相位差, 从而得到液晶空间光调制器的相位调制曲线。利用液晶空间光调制器实现了波前校正。由干涉仪作波前测试, 对待校正的畸变波前进行泽尼克多项式描述, 根据液晶空间光调制器的相位与灰度的关系, 产生相应的灰度图, 获得畸变波前的共轭波前, 从而完成静态波前的校正, 使相关参数如 PV 值、RMS 值和 Strehl 比值得到了改善。

关 键 词: 液晶空间光调制器; 相位调制; 泽尼克多项式; 静态波前校正

中图分类号: TN141.9; TN761 文献标识码: A

Measuring of the phase modulation of liquid crystal spatial
light modulator and correcting of the wavefront

WANG Zhi-hua, YU Xin

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A simple and better precision method to measure the phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator, namely, the relation between phase and gray value, is proposed. Using the digital wave front phase-shifting interferometer, the phase difference from different gray values can be directly obtained from the interferometer, so it is easy to get the phase modulating character of liquid crystal spatial light modulator. The wavefront correction is realized by using the liquid crystal spatial light modulator. The distorted wavefront can be tested and be expressed by Zernike polynomial in the interferometer, using the phase modulation character of liquid crystal spatial light modulator, the corresponding gray picture can be set up. The conjugate wavefront can be obtained, and thus the correcting of the static distorted wavefront is completed and proved by the improvement of the correlative parameters such as PV value, RMS value, strehl ratio.

Key words: liquid crystal spatial light modulator; phase modulation; Zernike polynomial; correcting of the static wavefront

1 引 言

在自适应光学系统中, 系统需要校正入射畸变波前的光程差 OP ($OP = z \times n$, z 为几何长度, n 为介质折射率)。传统的变形镜是通过调整 z 来获得波前校正的。在早期是通过改变折射率装置如液晶空间光调制器, 但因校正动态范围小和时间空间带宽较小等原因, 在自适应光学中仅得到了有限的应用。近些年来, 由于液晶显示技术和相关技术的发展以及丰富的液晶材料, 利用液晶空间光调制器替代变形镜在国外已受到日益关注。液晶空间光调制器可使自适应光学系统的结构大大简化、价格大幅度下降、校正精度接近极限水平等。

目前, 液晶空间光调制器 (LCSLM) 在自适应光

学中的研究根据材料性质的不同大致可分为三类(透射型): 第一类是作为显示器件用的扭曲向列型液晶器件^[1~4], 如 LCTV, LCD; 第二类是专门用于自适应光学的向列型液晶器件^[4~8]; 第三类也是专门用于自适应光学的双频或铁电液晶器件^[9~10]。第一类器件在相位调制过程中往往伴随着强度调制, 它们因显示器的需要而得到了大规模生产, 同时研究工作者们也对此类液晶器件的纯相位调制(强度变化在 10% 以内)做过不少研究, 并取得了不少有意义的成果^[11], 如纯相位调制量达到了 1.8π 。第二类器件主要是相位调制, 但是其时间带宽较低, 即使利用液晶的瞬时向列效应(TNE), 其相位调制的带宽也只能达到 8.3Hz。第三类器件的特点是提高了时间空间带宽积, 如在 2000 年, Sergio R Restaino 等人做了

* 收稿日期: 2004-06-15; 收到修改稿日期: 2004-10-19

E-mail: wzhi@bit.edu.cn

作者简介: 王治华(1979-), 男, 浙江省人, 北京理工大学信息科学技术学院光电工程系硕士研究生, 主要从事自适应光学、液晶空间光调制器方面的研究。

双频液晶空间光调制器的闭环校正实验。闭环校正可将 strehl 比值从 0.08 提高到 0.34, -3dB 的抑制带宽在 20Hz 左右, 但驱动电路复杂。

2 液晶空间光调制器的相位调制特性测量

考虑到第一类器件, 即 TN 型液晶器件的易获性, 研究中采用了 TN 型的 LCD。

2.1 液晶空间光调制器的相位调制特性原理

为了获得 TN 型液晶相位调制的数学模型, 设液晶分子的长轴与 x 轴的方向一致, 液晶层与前后偏振片的偏振方向的夹角如图 1 所示。

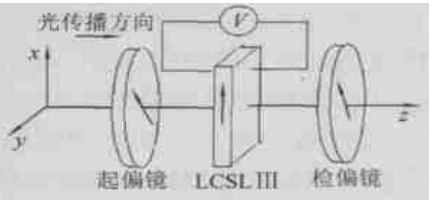


图 1 夹在起偏镜与检偏镜之间的 LCSLM 坐标图

TN 型液晶相位调制的原理为

$\delta = \beta - \tan^{-1} \frac{\frac{\beta}{\gamma} \sin(\gamma) \sin(\Psi_1 + \Psi_2)}{\frac{\pi}{2\gamma} \sin(\gamma) \cos(\Psi_1 - \Psi_2) + \cos(\gamma) \sin(\Psi_1 - \Psi_2)}$ (1)

式中, δ 为光场相位变化量; Ψ_1 为起偏镜的偏振方向与 x 轴的夹角; Ψ_2 为检偏镜的偏振方向与 x 轴的夹角; β 和 γ 的定义如下:

$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} [n_e(\theta) - n_o]$ (2)

$\gamma = \sqrt{(\pi/2)^2 + \beta^2}$ (3)

式(2)中的 θ 和 $n_e(\theta)$ 的含义如下:

$\theta = \begin{cases} 0 & V \leq V_C \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left\{ \exp \left[- \left(\frac{V - V_C}{V_0} \right) \right] \right\} & V > V_C \end{cases}$ (4)

$\frac{1}{n_e(\theta)} = \frac{\cos^2(\theta)}{n_e^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{n_o^2}$ (5)

式(4)和式(5)中的参量的涵义是: θ 为液晶分子因所加的电压 V 而引起的扭曲角; V_C 为液晶分子开始偏转时的起始电压, 即阈值; V_0 为液晶分子偏转达到 49.6° 时的电压; d 为液晶分子层的厚度; n_e 为双折射 e 光的折射率; n_o 为双折射 o 光的折射率。若 $\Psi_1 = 0^\circ$, $\Psi_2 = 90^\circ$, 则有

$\delta = \beta + \tan^{-1} \left[\frac{\beta}{\gamma} \tan(\gamma) \right]$ (6)

从式(1)至式(6)可以看出, 改变施加在液晶上的电

压, 就可以改变液晶空间光调制器的相位分布。在 LCD 中, 通常由 PC 通过液晶空间光调制器的驱动电路输入一定的灰度信号, 这样就会在液晶片上加上一定的电压, 从而使液晶空间光调制器产生一定的相位变化。所以在求液晶空间光调制器的相位调制特性时, 实际上就是求相位与灰度的关系。

2.2 液晶空间光调制器相位调制测量方法

目前, 在第一类器件的相位调制特性的测量中主要有三种方法: 双缝干涉法^[1]、



图 2 实验装置图

Mach-Zehnder 干涉法^[1]和共光路径向剪切干涉法^[2]。双缝干涉法难以对整个液晶面上的情况进行测量; Mach-Zehnder 干涉法需要具有稳定性很好的实验装置; 共光路径向剪切干涉法的后期处理需要进行大量的数学运算。本文提出了另一种测量方法, 就是使用数字波面移相干涉仪进行测量。该方法的实验装置图如图 2 所示。

实验中采用的液晶空间光调制器为 LCX023CMTT 和对角线尺寸为 3.3cm 的扭曲向列型液晶显示器面板(LCD)。采用的数字波面移相干涉仪为 Zygo 公司的 GPI-XPIV 干涉仪, 它的使用大大简化了对光路的调节, 仪器本身的稳定性使得只需要把偏振片和液晶空间光调制器(LCSLM)置入干涉仪的光路中即可。仪器采用的干涉方法是移相干涉法, 它的主要特点是测量精度高, 不确定度(峰谷值误差)可达到五十分之一波长, 可同时获得 LCSLM 整个液晶面上的相位分布情况, 而且还可以获得某些特定点之间的相位差, 于是可以非常简单地获得相位的调制特性。此外, 仪器所提供的强大的数据处理软件可方便地给出波面形状和相关的技术参数(PV 值、RMS 值、Strehl 比值和 Zernike 像差系数等), 这些技术参数无疑给液晶空间光调制器相位特性的测量和静态波前的校正带来了方便。

在实验中, 由于液晶空间光调制器使偏振光具有电控双折射效应, 导致异常光的折射率变化而产生相位调制, 所以需要采用偏振片从干涉仪产生的非偏振 He-Ne 激光中获得线偏振光。线偏振光的偏振方向平行于液晶空间光调制器的液晶分子方向。考虑到液晶空间光调制器相位调制范围很小, 所以采用了引入波前畸变较小的偏振棱镜。干涉仪在测量液晶空间光调制器的相位调制特性时, 通常

去掉由于偏振片和液晶空间光调制器自身的厚度以及安装时本身不能与光路垂直等所引入的平移项(PST)和倾斜项(TLT),但这并不影响测量液晶相位随灰度变化的关系。

2.3 液晶空间光调制器的相位调制特性及测量过程和实验结果

通过 PC 在液晶空间光调制器上加上如图 3(a)所示的灰度图,白色部分所对应的灰度值为 0,黑色部分所对应的灰度值为 240,这时在干涉仪上的条纹图如图 3(b)所示,可看到黑色部分对应的条纹相对于白色部分发生了位移。图 3(c)是图 3(b)的中心部分的圆域所对应的三维波面图。

如图 3(b)所示,在与图 3(a)相对应的不同灰度上取具有代表性的两点 A 和 B,并对应于图 3(c)上的 A、B 两点。由于干涉仪测量给出的 A 与 B 之间的相位差为 0.404

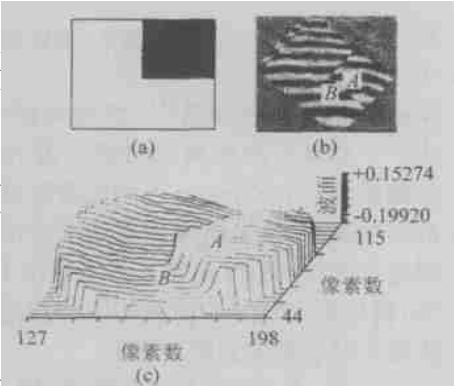


图 3 相位测试图
(a) 灰度变化图; (b) 输入信号后的干涉条纹图; (c) 条纹对应的三维波面图。

π 。保持图 3(a)中的白色部分的灰度为 0,黑色部分的灰度值以 15 为间隔在 0 ~ 255 范围内变化。每次取出 A 和 B 对应的相位差,就可以得到相应的位

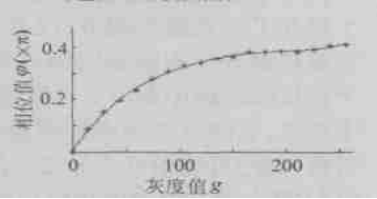


图 4 液晶空间光调制器的相位调制变化曲线

相随灰度改变的调制变化曲线。所得到的数据进行最小二乘,通过五次多项式拟合可获得

$$\begin{aligned} \phi = f(g) = & 1.207931870051732 \times 10^{-12} g^5 - \\ & 8.089155155456518 \times 10^{-10} g^4 + \\ & 2.378236031711068 \times 10^{-7} g^3 - \\ & 4.529948469442262 \times 10^{-5} g^2 + \\ & 6.006769681762245 \times 10^{-3} g + \\ & 3.305873379100451 \times 10^{-3} \end{aligned} \tag{7}$$

式中, g 为灰度值; ϕ 为相位值。通过拟合所获得的曲线如图 4 所示。

由实验数据可同样获得与相位相应的灰度公式。用最小二乘,通过五次多项式拟合后为

$$\begin{aligned} g = f^{-1}(\phi) = & 10000 \times (4.63682454579638 \phi^5 - \\ & 0.18153685132834 \phi^4 - 1.18995506326301 \phi^3 + \\ & 0.37178941105053 \phi^2 - 0.00930076092787 \phi + \\ & 0.00002307039851) \end{aligned} \tag{8}$$

3 液晶空间光调制器的静态波前校正

为了进行静态波前校正,需要对静态畸变波前的相位信息进行测量和描述。目前,一种应用较广的方法是用泽尼克多项式描述波前,其优点是既可以描述相对复杂的波前,同时又能保证足够的精度。Zygo 干涉仪能提供对畸变波前的泽尼克多项式描述,这意味着在液晶空间光调制器的静态波前校正的实验中用该干涉仪作为测试装置是十分方便的。

3.1 液晶空间光调制器静态波前校正原理

光波在半径为 R 的圆域上的波前可用泽尼克多项式来表示:

$$\varphi(\rho, \theta) = \sum_i a_i z_i(\rho, \theta) \tag{9}$$

式中, ρ 为极坐标,其范围为 0 ~ 1; θ 表示极角,其范围为 0 ~ 2π ; a_i 为第 i 阶泽尼克模式的系数; $z_i(\rho, \theta)$ 为第 i 阶泽尼克模式,其中 i 为模序数。 $z_i(\rho, \theta)$ 定义如下:

$$\begin{cases} z_i = (n+1)^{1/2} R_n^0(\rho) & m=0 \\ z_i = [2(n+1)]^{1/2} R_n^m(\rho) \cos(m\theta), i=2j & m \neq 0 \\ z_i = [2(n+1)]^{1/2} R_n^m(\rho) \sin(m\theta), i=2j-1 & m \neq 0 \end{cases}$$

式中, n 和 m 为整数,并满足关系

$$\begin{aligned} n - m &= 2p \quad p = 0, 1, 2, \dots \\ R_n^m(\rho) &= \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m-s}{2}\right)! \left(\frac{n-m-s}{2}\right)!} \rho^{n-2s} \end{aligned}$$

为了用液晶空间光调制器校正圆域内的畸变波前,校正方式采用了子区域校正的形式,子区域的形状采用方块形式,如图 5 所示。

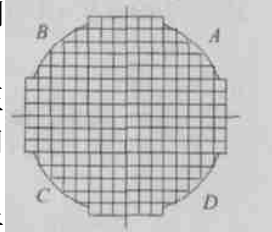


图 5 圆域子区域划分图

在圆域内的 A 区,把任意一子区域的中心点的直角坐标设为 (x, y) ,化为极坐标后得

$$\rho = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \tag{10}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} \tag{11}$$

该子区域在 B、C 和 D 象限内,在对应子区域中心的极坐标中,其极半径值相同,极角值的计算不能采用式(11),需要转化为如下公式:

$$\theta_B = \pi - \theta \tag{12}$$
$$\theta_C = \pi + \theta \tag{13}$$
$$\theta_D = 2\pi - \theta \tag{14}$$

由式(9)~式(14), 且在 a_i 已知的情况下可得到圆域内任意一点所对应的相位。

由干涉仪提供的畸变波前的泽尼克模式系数, 并结合式(9)~式(14)可得到畸变波前在各子区域中心的相位值, 以每个子区域中心的相位值代替整个子区域的相位值, 找到所有子区域中的最大相位值, 算出其余各子区域相对于最大相位值的相位差, 根据这些相位差值并利用式(8)即液晶空间光调制器的相位调制特性, 同时利用式(9)~式(14)编写校正畸变波前的软件即可获得相应的灰度图, 灰度图通过 PC 及驱动电路施加到液晶上生成共轭波前, 这样畸变波前即可得到校正。

3.2 液晶空间光调制器静态波前校正的实验及结果

表 1 泽尼克模式系数

项数 i	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
a_i	-0.006	-0.111	0.089	-0.024	0.018	0.002	-0.028	-0.003	0.033	0.007	0.002
项数 i	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
a_i	-0.004	-0.004	0.007	0.014	0.020	-0.003	-0.006	-0.004	0.002	0.006	0.007
项数 i	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
a_i	-0.008	0.011	-0.013	-0.008	-0.009	-0.001	-0.006	-0.001	-0.002	-0.008	-0.001

在校正畸变波前的软件中, 使用这些数据所产生的灰度图如图 7(b)所示。将灰度图施加到液晶空间光调制器上产生共轭波前。通过干涉仪检测后, 条纹由图 7(a)变成图 7(c)的形式, 从中可以看到条纹被明显拉直了; 三维波面由图 7(d)变成图 7(e)的形式后, 从中可以看到波面明显地变平整了。由干涉仪测量得到的相关参数为: $PV = 0.254$, $RMS = 0.036$, $Strehl = 0.951$ 。

4 结 论

液晶空间光调制器静态波前校正的实验装置如图 6 所示。



图 6 静态波前校正的实验装置图

通过在如图 6 所示的光路中插入相位板可引入畸变波前, 同时 PC 对液晶空间光调制器施加灰度值为 0 的灰度图。在如图 7(a)所示的圆域内, 通过干涉仪测量可得到相关参数: $PV = 0.308$, $RMS = 0.062$, $strehl = 0.86$, 还有畸变波前数据即泽尼克模式的系数。图 7(a)为未校正的条纹图, 图 7(d)为未校正的三维波面图。需要指出的是, 测量得到的畸变波前除了相位板引入的畸变波前外, 还包括偏振片和液晶空间光调制器等引入的系统畸变波前。干涉仪最多可提供 36 项系数, 去掉前三项后剩下的 33 项数据列于表 1。

本文所提出的液晶空间光调制器的相位调制特性测量方法利用了 GPI-XPIV 数字波面移相干涉仪, 用它来测量液晶空间光调制器的相位调制特性。它具有光路简单, 测量精确, 能对整个液晶面的相位进行测量, 同时还可以提供丰富的测量数据如泽尼克多项式系数、RMS 值和 Strehl 比值等, 使得研究更加方便。该方法也适用于其它透射型液晶器件的相位检测。

用液晶空间光调制器作波前校正, 采用了子区域校正的方式。子区域的数目可方便的从个位数变成成千上万, 这是分立表面多道变形镜所没有的优点; 校正精度高, 无运动型部件, 系统耗电少。实验中由于条件限制, 所采用的液晶空间光调制器的相位调制范围较小。尽管如此, 有理由相信将来的液晶空间光调制器在许多场合可代替传统的变形镜, 能更好地满足自适应光学中波前校正器的要求。

参考文献:

[1] 陈怀新, 等. 液晶电视(LCTV)的光学调制特性及其应用[J]. 中国激光, 2000, (8): 741—745.
[2] 赵晓凤, 等. 用径向剪切干涉法测量液晶空间光调制器的位相调制特性[J]. 四川大学学报, 2002, (4): 675—679.
[3] 李大海, 等. 用液晶电视的位相调制特性补偿畸变波前[J]. 中国激光, 2003, (7): 614—618.

(下转第 201 页)

方。由调制盘出来的光束经光束投影系统的移位、转向后, 第二次通过调制盘, 此时光束通过调制盘的外调制光路图案^[1], 并位于调制盘中心的正左方(图 1)。二次通过调制盘的光束形成了变焦系统的物方光场, 经变焦系统成像在物镜的焦面上。

下面分析光束二次通过调制盘的情况。第一次激光束落在调制盘内调制光路上, 当调制盘转动时, 相当于光束在内光路上扫描, 产生 $f_4 \sim f_6$ 的光脉冲频率^[1], 它所提供的偏离中心的径向坐标相当于变焦系统物方的上下(垂直)坐标。第二次激光束落在外调制光路上, 当调制盘转动时, 相当于光束在外光路上扫描, 产生 $f_1 \sim f_3$ 的光脉冲频率^[1], 它所提供的偏离中心的径向坐标相当于变焦系统物方的左右(水平)坐标。综合起来看, 由于光束二次通过调制盘, 所以激光束同时照亮了内外调制光路, 在调制盘转动的条件下, 以直角坐标的形式给出偏离中心的垂直和水平信息, 并作为变焦系统的物方光场。变焦系统将这样的物方光场成像在瞄准系统物镜的焦面上, 由物镜向空间投射而构成投向空间的控制场。

3 光束投射与投影系统

由激光器出射的激光束经投射系统后, 投射到调制盘的内调制光路中。激光投射系统的组成如图 2 所示, 各元件的空间位置关系如图 1 中的组件标号 47 所示。

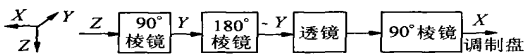


图 2 光束投射系统

激光束沿 Z 向出射, 经 90° 棱镜折转 90° 后沿 Y 方向出射; 经过透镜校正后, 入射到又一个 90° 棱镜, 该棱镜将光束折转 90° 后沿 X 方向投射到调制盘上。

对激光束投射系统的要求是: 激光束经投射系统后应以正交的方式投射到调制盘内的调制光路的中心, 光束线性区的大小应充满调制光路的范围(1.35mm)。投射系统各元件的空间位置的配置应满足仪器结构尺寸紧凑的要求。

光束投影系统的入射光束是经过调制盘后的激光束, 其出射光束被投射到调制盘的外调制光路中, 调制盘对光束作二次调制。光束投影装置的组成如图 3 所示, 各元件的空间位置的关系如图 1 中的组件标号 50 所示。



图 3 光束投影系统

对投影系统的主要要求是: 将光束中心从内调制光路的中心转移到外调制光路的中心, 这个转移在直角坐标系中的实现是将入射光束的中心向 Y 方向平移一段距离, 它等于外调制光路的中心半径, 即 26.15mm; 在此基础上, 再向 Z 方向平移一段距离, 它等于内调制光路中心的半径, 即 23mm。所以在图 3 的组成中有两个棱镜, 其中 180° 棱镜将光束中心平移 26.15mm, 而 0° 棱镜将光束中心平移 23mm。投影系统的入射光束和出射光束都沿 X 方向, 只是折转了 180°, 沿入射光束再次经过调制盘外调制光路的调制, 最终形成完整的调制光场。

4 结 论

调制盘系统包含有光束投射系统、光束投影系统和旋转调制盘。由调制盘系统出射的控制光场具有以直角坐标形式给出偏离中心误差信号的调频编码特征。控制光场中具有 5 种频率: f_1, f_2, f_4, f_5 和 f 。频率经历的时间差线性地反映了误差信号。 $(T_{f2} - T_{f1})$ 反映了 Y 向的偏离坐标, $(T_{f5} - T_{f4})$ 反映了 Z 向的偏离坐标, $f = f_3 = f_6$ 则是导弹接近波束中心的频率特征。

在导弹导引过程中, 弹上的激光接收装置把控制场中的光信号转换为调频电信号, 由监频器和处理电路可分别得到 $T_{f1}, T_{f2}, T_{f4}, T_{f5}$ 和 T_f , 最终以 $(T_{f2} - T_{f1})$ 和 $(T_{f5} - T_{f4})$ 作为控制信号去控制导弹沿着激光束的中心线飞行。

参考文献:

[1] 江月松, 等. 某型号瞄准制导仪中调制盘图案的设计[J]. 光学技术, 2005, 31(1).

[8] Kudryashov A V, et al. Liquid crystal phase modulator for adaptive optics-Temporal performance characterization[J]. Optics Communication, 1997, 141: 247—253.

[9] Restaino S R et al. On the use of dual frequency nematic material for adaptive optics system: first results of a closed-loop experiment[J]. Optics Express, 2000, 6(1).

[10] Birch P M, et al. Real-time optical aberration correction with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulators[J]. Applied Optics, 1998, 37(11).

[11] 胡晓改. LCD 光学纯相位效应的研究[D]. 北京: 北京理工大学图书馆, 2003.

(上接第 199 页)

[4] Dou Rensheng, Giles M K. Closed-loop adaptive-optics system with a liquid-crystal television as a phase retarder[J]. Optical Letters, 1995, 20: 1583—1585.

[5] Love G D, et al. Adaptive wave-front shaping with liquid crystals[J]. Opt Photon News, 1995, (10): 16—21.

[6] Love G D. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator[J]. Applied Optics, 1997, 36: 1517—1524.

[7] James Gourlay, et al. A real-time closed liquid crystal adaptive optics system: first results[J]. Optics Communication, 1997, 131: 17—21.