

基于液晶空间光调制器的涡旋相位恢复检测系统像差

吴华钦^{1,2,3} 郑明杰^{1,2,3} 李志芳^{1,2,3} 陈大强^{1,2,3} 李 晖^{1,2,3}

¹福建师范大学医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007

²福建师范大学福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007

³福建师范大学光电与信息工程学院, 福建 福州 350007

摘要 提出一种基于液晶空间光调制器对涡旋相位进行相位恢复的方法, 这有别于传统相位恢复算法。实验中利用液晶空间光调制器产生光学涡旋, 再利用 CMOS 摄像头来捕捉涡旋光斑。采用改进的 GS 算法对系统相位进行恢复, 算法中入射液晶面光振幅与随机输入相位结合进行迭代计算恢复液晶波阵面。因为程序经过多次迭代计算均恢复出涡旋相位, 故证实该方法可进行相位恢复。通过计算得出系统的像差, 同时利用泽尼克多项式对系统像差进行了定量分析。

关键字 傅里叶光学; 液晶空间光调制器; 相位恢复; 光学涡旋; GS 算法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.080701

Vortex Phase Retrieval for Detecting System Aberration Based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Wu Huaqin^{1,2,3} Zheng Mingjie^{1,2,3} Li Zhifang^{1,2,3} Chen Daqiang^{1,2,3} Li Hui^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

²Fujian Provincial Key Laboratory of Photonic Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

³College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

Abstract We present a vortex phase retrieval method based on liquid crystal spatial light modulator. It's different from traditional phase retrieval method. In this method, a liquid crystal spatial light modulator is used to show the optical vortex phase, and a CMOS camera captures the donut image. A modified GS algorithm iteratively calculates the target phase with a random phase input and amplitude before LCD surface. The procedure recovers the vortex phase after several iterative calculation and it is confirmed that the method can be workable. Finally, we calculate the system optical aberration and quantitatively analyze the aberration by using Zernike decomposition.

Key words Fourier optics; liquid crystal spatial light modulator; phase retrieval; optical vortex; GS algorithm

OCIS codes 070.6120; 060.5060; 100.5070; 350.4600

1 引言

光在传播过程中不仅携带振幅信息, 同时携带相位信息。相位信息会记录振幅中所没有的信息, 对相位信息的检测能够用于检测图像特征, 这在图像处理、模式识别等领域有着非常重要的意义。目前直接测量光场相位分布的探测器价格昂贵, 而利用相位恢复技术来恢复光场的相位信息具有操作简单, 成本低的优点。相位恢复技术是在实际测量光场的振幅分布后, 利用相位恢复算法来反推出光场的相位分布的技术。相位恢复在自适应光学系统、激光光束检测、衍射光学等领域都有非常广泛的应用。在相位恢复技术

收稿日期: 2014-01-26; 收到修改稿日期: 2014-02-20; 网络出版日期: 2014-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(61178089/81201124)

作者简介: 吴华钦(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光镊方面的研究。E-mail: fjwhqin@foxmail.com

导师简介: 李 晖(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事生物医学方面的研究。E-mail: hli@fjnu.edu.cn(通信联系人)

方面,很多科研工作者做了大量研究,其中清华大学和中国工程物理研究院应用相位恢复技术对强激光畸变波前进行高精度重构^[1];美国科学家利用该技术校正哈勃天文望远镜的像差^[2]。相位恢复能够实现镜面测量,满足大型镜面加工在位检测的需求^[3];减小畸变波前相差,提高光栅型波前曲率传感器精度^[4],适用于大误差检测^[5];同时在光学密码^[6]、反射激光雷达成像^[7]、三维形貌复合通道测量技术^[8]、液晶空间光调制器的相干光波前实时变换^[9]等方面都有非常广泛的应用。

纯位相型液晶空间光调制器(LCoS-SLM)在精密光学等方面的应用都非常广泛。首先能够根据需求生成二元全息位相图;其次,其输入位相与输出结果之间构成反馈关系,可构建自适应系统^[10]。纯位相型空间光调制器被还广泛应用于激光整形系统^[11]、全息光镊系统^[12]、光路像差校正系统^[13]、自适应光学系统^[14]等。本文利用纯位相型液晶空间光调制器生成光学涡旋位相,涡旋位相比较好地生成对像差及液晶的位相偏差较敏感的LG01涡旋光束。涡旋光束^[15]是螺旋波阵面和中心奇异涡旋的光束,具有无衍射、轨道角动量、自旋角动量的矢量光束特性,可应用于光镊系统、光学微操纵系统、光学测量系统、计算全息等方面。

2 涡旋波面的GS算法检出系统像差的原理

利用已知的涡旋波面进行系统像差检测的基础是进行相位恢复,检测原理光路如图1所示^[16]。首先在空间光调制器(SLM)上施加涡旋波面,然后将准直的激光入射SLM,经过SLM上涡旋(vortex)位相调制的光束经透镜聚焦到CCD上,即能测得位相调制后的光场振幅的傅里叶变换分布。将CCD测得的光场作为GS算法的输入振幅,经过程序迭代运算,如果系统像差为0即得到SLM的涡旋相位分布。然而光学系统中存在像差,使得程序迭代运算恢复出的相位分布与SLM产生的涡旋相位存在一定差别,二者相减即可计算出系统像差。

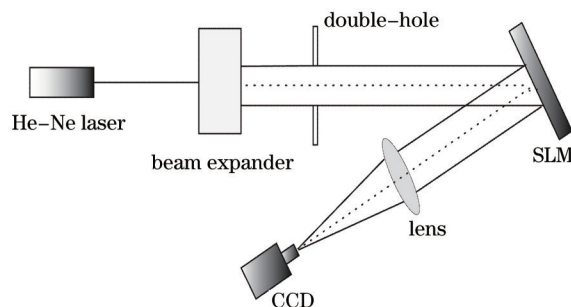


图1 基于液晶空间光调制器的相位恢复的实验光路图

Fig.1 Phase retrieval experimental setup based on LCoS-SLM

各种相位恢复算法中GS算法收敛速度最快。GS算法^[17]又称为最速下降法,是在物平面与像平面上施加限制条件、然后在二者之间进行来回迭代傅里叶变换的方法,本文的相位恢复流程如图2所示。首先将入射LCoS-SLM的光振幅与随机位相结合进行傅里叶变换,得到的位相与涡旋位相比较,若相位分布一致,则输出;若不一致,则将振幅替换成CCD测得的光场振幅后与输出位相结合进行反傅里叶变换,再将振幅替换成入射液晶面的光振幅后与相位结合进行傅里叶变换,如此反复循环直到输出位相与涡旋位相一致或者达到迭代次数为止。GS程序根据实际光学系统进行修改。经GS算法恢复出的相位分布与LCoS-SLM上施加的涡旋位相进行比较,可得出系统像差。

3 实验及结果

系统像差检测光路如图1所示。采用德国HOLOEYE(型号为PLUTO-VIS)的反射式液晶SLM。He-Ne激光(633 nm)经扩束准直,透过孔径光阑入射至液晶SLM上,出射光经透镜聚焦后成像于CCD。根据PLUTO-VIS的视场角,入射液晶面光束与出射液晶面光束之间的夹角控制在6°以内。

SLM产生的涡旋如图3所示,其包含涡旋位相,透镜信息及LCoS-SLM量化阶次信息。其中涡旋位相的阶数为1,透镜焦距为1000 mm,闪耀光栅为16阶。图4为CCD拍到涡旋位相光束的强度分布图。

对原图像进行补零^[18]工作,可以减小傅里叶变换过程中取样间隔增加取样数,提高GS算法中傅里叶变换的分辨率,减少相位恢复的误差。分辨率公式表示为

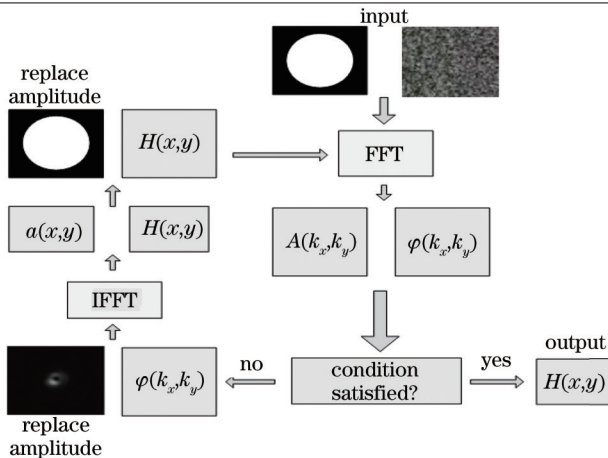


图2 基于液晶空间光调制器的涡旋位相恢复流程图

Fig.2 Phase retrieval flowchart based on LCoS-SLM

$$N = \frac{\lambda f}{T_{SLM} T_{CMOS}}, \tag{1}$$

式中 λ 为入射光波长, f 为透镜焦距, T_{SLM} 与 T_{CMOS} 分别为 SLM 的像素尺寸与 CCD 的像素尺寸。在进行傅里叶变换中, 将原图像插值至 2048 pixel×2048 pixel, 使得计算数目更多, 结果分辨率更高, 成像效果更好。

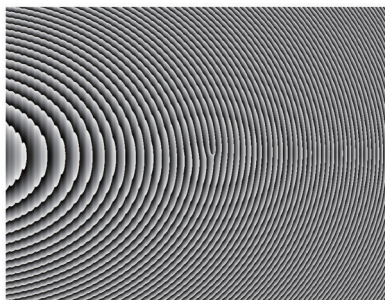


图3 液晶空间光调制器产生的位相图

Fig.3 Phase information on the liquid crystal SLM

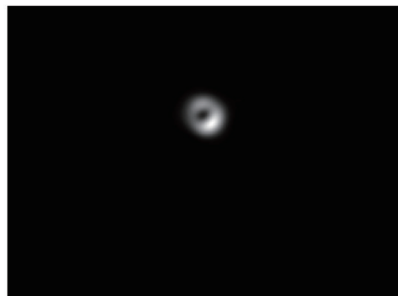


图4 CCD 拍摄到的环形光

Fig.4 Vortex captured by CCD

图5为光斑位置未经过任何处理, 成像中心不在 CCD 中心处的光振幅分布迭代 50 次恢复出的光场相位分布, 与标准位相对比可知, 未将成像中心置于 CCD 中心处的光振幅, 无法正确恢复出光场的相位分布。图5中条纹来源波面整体倾斜, 是入射角较大造成的, 会影响正确的涡旋位相恢复。而将光斑位置移至 CCD 成像中心能够提高相位恢复的准确性^[19]。通过记录只含 f1000 透镜位相信息和 LCoS-SLM 量化阶次信息的焦点图案, 可实现中心对准, 消除计算结果中的条纹。图6为将光斑移至 CCD 成像中心处的光场振幅分布图。将此作为 GS 算法的输入光振幅, 同样迭代 50 次, 得到图7所示的恢复相位分布。

迭代 70 次与 100 次所恢复位相如图8与图9所示, 迭代 50 次、70 次、100 次所得误差分布如图10所示。



图5 初始光场振幅分布迭代 50 次恢复的相位分布

Fig.5 Recovery phase distribution of 50 iterations for

initial amplitude

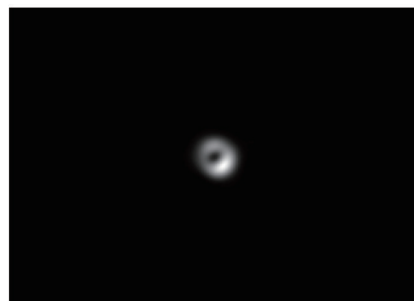


图6 光斑移至 CCD 成像中心的光场振幅分布

Fig.6 Amplitude distribution for light spot moving to the

center of CCD

从误差分布可知,GS算法的收敛速度很快,程序迭代35次时算法可以保证收敛。程序迭代50次最小误差为0.14565,迭代70次最小误差为0.14206,迭代100次最小误差为0.1345。



图7 处理后光场振幅分布迭代50次恢复的相位分布
Fig.7 Recovery phase distribution of 50 iterations for later amplitude



图8 处理后光场振幅分布迭代70次恢复的相位分布
Fig.8 Recovery phase distribution of 70 iterations for later amplitude



图9 处理后光场振幅分布迭代100次恢复的相位分布
Fig.9 Recovery phase distribution of 100 iterations for later amplitude

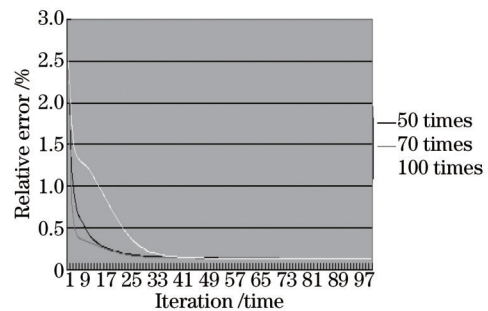


图10 相位恢复算法迭代50次、70次、100次误差分布
Fig.10 Error distribution for phase retrieval algorithm, 50 times, 70 times and 100 times

程序迭代50次、70次、100次恢复的相位均有跳跃,且均出现不同程度的弯曲。原因是:首先加载在液晶SLM上的电场是连续的,但在0和 2π 这个位相跳跃区间液晶分子无法呈现与调制位相一致的方向,使得液晶空间光调制器对0和 2π 之前位相调制存在误差,即液晶像素间存在明显串扰,液晶像素的串扰随电压的加大而增强,不加电压像素灰度为0,则恢复出的相位分布与标准位相存在一定偏差;其次液晶表面不平整和液晶SLM的Gamma校正不准确都会使得恢复相位分布与标准存在偏差。

将程序迭代50次计算出的相位分布与标准入射相位分布进行比较,可得出系统像差,如图11所示。利用泽尼克多项式对像差进行分析,泽尼克多项式前9项表达式为

$$\phi = -0.3588Z_0 + 1.0410Z_1 + 0.5979Z_2 + 0.1478Z_3 - 0.5201Z_4 - 0.1061Z_5 + 0.0591Z_6 - 0.7574Z_7 - 0.1282Z_8 \quad (2)$$



图11 基于液晶空间光调制器的相位恢复系统像差

Fig.11 Aberration of phase retrieval system based on LCoS-SLM

4 结 论

经过GS算法恢复出的相位分布结果表明,基于液晶SLM的涡旋位相可准确检出系统像差。迭代50次恢复出的相位就能达到像差检测精度要求。尽管涡旋上0与 2π 的界限位置不同,但是旋转对称性对产生

环形没有影响。

参考文献

- 1 Zeng Fa, Tan Qiaofeng, Wei Xiaofeng, *et al.*. High precision reconstruction of distorted wavefront in high power laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(1): 27-30.
曾发, 谭峭峰, 魏晓峰, 等. 强激光畸变波前的高精度重构[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(1): 27-30.
- 2 Fienup J R, Marron J C, Schulz T J, *et al.*. Hubble space telescope characterized by using phase retrieval algorithms[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(10): 1747-1767.
- 3 Wu Yulie, Hu Xiaojun, Dai Yifan, *et al.*. *In situ* surface measurement for large aperture optical mirror based on phase retrieval technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 157-163.
吴宇列, 胡晓军, 戴一帆, 等. 基于相位恢复技术的大型光学镜面面形在位检测技术[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 157-163.
- 4 Shen Hongbin, Xu Xiaojun, Liu Zejin, *et al.*. Theory and algorithm for a new wavefront of phase retrieval curvature sensor[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2007, 19(2): 33-40.
沈洪斌, 许晓军, 刘泽金, 等. 光栅型波前曲率传感器原理与相位恢复研究[J]. *军械工程学院学报*, 2007, 19(2): 33-40.
- 5 Hu Xiaojun, Zhao Jinjin. Study on high dynamic surface on-sit test of large mirrors base on phase retrieval[J]. *Metrology and Measurement Technique*, 2011, 38(1): 22-24.
胡晓军, 赵锦瑾. 大型镜面大误差范围相位恢复在位测量研究[J]. *计量与测试*, 2011, 38(1): 22-24.
- 6 Tang Hongqiao. *Phase Retrieval Theory and Application in Optical Cryptography Analysis*[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2008.
汤红乔. *光学密码分析中的相位恢复理论与应用*[D]. 深圳: 深圳大学, 2008.
- 7 Jin Xiaofeng, Sun Jianfeng, Yan Yi, *et al.*. Application of phase retrieval algorithm in reflective tomography laser radar imaging[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(1): 012801.
- 8 Ma Suodong. *Research on Techniques and Applications for Phase Retrieval Based Three-Dimensional Profile Testing with Complex-Channel*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
马锁冬. *基于相位恢复的三维形貌复合通道测量技术及应用*[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- 9 Liu Bohan. *Research of Light Realtime Transformation Based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology University, 2008.
刘伯晗. *基于液晶空间光调制器的相干光波前实时变换的研究*[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- 10 Huang Ziqiang. *LCD Principle*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. reprint, 1-10.
黄子强. *液晶显示原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. 重印, 1-10.
- 11 Ma H, Zhou P, Wang X, *et al.*. Near-diffraction-limited annular flattop beam shaping with dual phase only liquid crystal spatial light modulators[J]. *Opt Express*, 2010, 18(8): 8251-8260.
- 12 Farre A, Shayegan M, Quesada C L, *et al.*. Positional stability of holographic optical traps[J]. *Opt Express*, 2011, 19(22): 21374-21384.
- 13 Dienerowit Z M, Gibson G, Padgett M, *et al.*. Holographic aberration correction: optimising the stiffness of an optical trap deep in the sample[J]. *Opt Express*, 2011, 19(24): 24589-24595.
- 14 Gould T J, Burke D, Bewersdorf J, *et al.*. Adaptive optics enables 3D STED micro-scopy in aberrating specimens[J]. *Opt Express*, 2012, 20(19): 20998-21009.
- 15 P Andrew Penz. Voltage-induced vorticity and optical focusing in liquid crystals[J]. *Phys Rev Lett*, 1970, 24(25): 1405-1409.
- 16 Dong Wang, Jian Zhang, Hao Wang, *et al.*. Variable shape or variable diameter flattop beam tailored by using an adaptive weight FFT-based iterative algorithm and a phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(24): 5044-5050.
- 17 Yan Shuhua. *Design of Diffractive Micro-Optics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. 66-71.
颜树华. *衍射微光学设计*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. 66-71.
- 18 Zhang Zhen, Hu Hongtao, Xu Hongtao. The application of zero padding of the DFT in digital image processing based on VC[J]. *Microcomputer Information*, 2007, 36: 291-292.
张震, 胡洪涛, 许洪涛. 基于VC的补零DFT在图像处理中的应用[J]. *微计算机信息*, 2007, 36: 291-292.
- 19 A Jesacher, A Schwaighofer, S Furhapter, *et al.*. Wavefront correction of spatial light modulators using an optical vortex image[J]. *Opt Express*, 2007, 15(9): 5801-5808.