文章编号:1002-2082(2010)05-0690-05

基于成像自适应光学的水下成像系统研究

张 利[1,2]，孙传东[1]，何俊华[1]
(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所，陕西 西安 710119；
2. 中国科学院研究生院， 北京 100039)

摘 要：水中湍流是影响水下光学系统性能的重要的潜在因素。用波前检测的方法对水中湍流对激光束传输的影响进行实验研究，测量了实验条件下水中湍流产生的波前畸变的大小，对波前畸变进行了Zernike分析，还对波前补偿自适应系统在水下成像的应用进行了探索。结果表明：水中湍流引起的激光束波前的起伏降低了图像的分辨率，自适应光学系统在其校正范围内能有效地校正畸变，提高图像质量。

关键词：水下成像；自适应光学；湍流；波前校正
中图分类号：TN911.73；P715.5 **文献标志码**：A

Underwater imaging system based on adaptive optics

ZHANG Li[1,2], SUN Chuan-dong[1], HE Jun-hua[1]
(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China;
2. Graduate School, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: Underwater-turbulence may have an impact on the performance of underwater imaging system. The impact of underwater-turbulence on laser beam propagation is studied with wave-front test. The distortion introduced by underwater-turbulence is measured and analyzed using the Zernike polynomial. The adaptive optical system with wave-front compensation is investigated for underwater imaging. The result shows that underwater-turbulence reduces the resolution of underwater imaging system. Calibration experiment is carried out to show that adaptive optical system can improve the quality of underwater images effectively.

Key words: underwater imaging; adaptive optics; turbulence; wave-front calibration

引言

影响水下成像的主要因素是水的吸收、散射与水中湍流。由于水对光的吸收[1]与散射[2,3]十分强烈，尤其是强烈的散射，使得水下成像系统的作用距离与分辨率都比较差，限制了水下成像系统的应用。目前国际上开展水下光学成像研究的机构比较多，在解决散射问题的研究上取得了不小的成绩，相继提出了激光距离选通技术[4]、激光扫描技术等新的水下成像技术，这些技术的应用较大地提高了水下成像系统的作用距离，如法国的基于距离选通技术的水下成像系统的作用距离已经达到160 m。一般认为，光束在水中传输1 m受到的影响相当于在空气中传输800 m～1 000 m受到的影响，因此，根据对大气湍流的研究经验[5-6]，水中湍流是影响水下成像系统分辨率的一个重要的因素。随着水下成像系统作用距离的提高以及人们对水下远距离高分辨观察需求的增长，图像的分辨率问题会成为人们不得不关注的焦点。由于水下成像图像分辨率的降低主要是由水的扰动、水的密度、温度等因素的随机变化产生的湍流效应引起的和极小角度前向散射引起的，距离选通技术、激光扫描技术等不能很好地解决此问题。目前，国内外对水中湍流对

收稿日期:2010-02-02； **修回日期**:2010-05-04
作者简介:张利(1984－)，男，安徽阜阳人，硕士研究生，主要从事水下成像技术的研究工作。E-mail:zlgx2@163.com

水下光学系统的影响的研究几乎还是空白,人们还不清楚水中湍流对水下系统影响的具体情况,这使得水中湍流成为研制水下激光通信系统和水下激光成像系统过程中的一个重要的不可知因素。

本文在实验条件下,探测了水中湍流对激光束波前的影响,并对波前补偿成像自适应光学系统在水下成像的应用进行了初步的探索。

1　波前补偿成像自适应光学系统原理

自适应光学是一门对波前相差进行实时测量和校正的光学学科。其原理和实现方式有多种,都是为了改善系统的某项性能,如输出光束强度、输出模式、成像质量等。其中成像自适应光学系统以提高系统的成像质量,得到接近衍射极限的图像质量为目标。对于成像系统,主要有基于两种不同波前处理方法的自适应光学系统,即波前补偿系统和像清晰化系统[7]。像清晰化系统对波前校正器的自由度是按顺序操作的,收敛速度慢,且随通道数的增加而越来越慢;对于大孔径系统,系统不稳定;畸变较小时,像清晰化传感器不灵敏,且不能保证系统总是收敛于整体最大值。像清晰化系统不适合在低光能系统上应用,但可以应用于激光聚焦系统等激光系统上。本文对适用于被动成像观察的波前补偿系统对自适应光学在水下成像的应用进行了研究。波前补偿系统的原理图如图1所示。

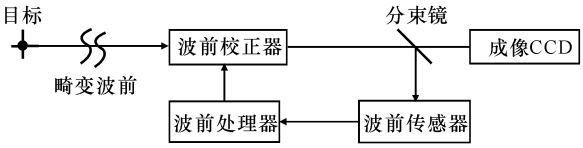


图1　波前补偿自适应光学系统

Fig. 1　Adaptive optical system based on wave-front compensation

在波前补偿系统中,波前的处理是基于波前的多项式分解进行的。畸变波前可以理解为一个无畸变的平均波前与畸变的组合,环境影响造成的畸变可以分解为一组正交归一化多项式和的形式。常用的多项式为Zernike多项式[8],对于有畸变的波前$w(x,y)$,其Zernike多项式分解为

$$w(x,y)=\overline{w(x,y)}+\sum_{i=1}^{n}a_iZ_i(x,y)+\Delta w(x,y)=\overline{w(x,y)}+\sum_{i=1}^{n}\Big[A_iR_i^0+\sum_{m=1}^{i}R_i^m(\sqrt{x+y})^m(B_{nm}\cos(m\theta)+C_{nm}\sin(m\theta))\Big]+\Delta w(x,y)$$

式中:N为使用的Zernike多项式的项数;Z_i表示第i阶Zernike多项式;a_i为Z_i的系数;$\Delta w(x,y)$表示Zernike分解的残差;A_i、B_i、C_i分别为相应阶Zernike多项的系数,波前的Zernike分解系数的前几项分别与初级相差对应。

波前补偿系统中实现波前校正的基本过程为:目标发出的光的波前经过传输介质发生畸变,畸变波前经过波前校正器后分成2束,一束用于成像与观测,一束进入波前传感器;波前传感器把得到的波前信息转化为畸变信号,波前畸变信号经波前处理器后产生控制信号,控制波前校正器运动,补偿波前畸变。

2　实验设计

设计的研究波前补偿自适应光学系统在水下成像应用的可行性的实验的基本装置布局示意图如图2所示。激光器发出的光束经过50 μm的针孔和准直镜后变为准直光束,经过水池后,通过半透半反镜1照射在变形反射镜(DM)[9]上,DM反射的光束在经过半透半反镜1反射后,经过半透半反镜2分束,一束通过鉴别率板和物镜,成像在CCD上,另一束照射在哈特曼-夏克波前传感器(HSWS)上,用于探测波前。实验使用的变形反射镜是荷兰OKO公司口径为30 mm的19单元压电陶瓷致动的连续面型可变形反射镜,校正范围8 μm;使用的波前传感器为Ueye的有效通光口径为3.6 mm的127单元正六边形微透镜阵列的哈特曼-夏克波前传感器[10],波前采集频率(0～50)帧/s可调;使用532 nm的半导体激光器作为光源;湍流是在1 m长的水池中以对流的方式产生的,进水口直径约2 cm,经实验检验,该方式简单有效且不产生气泡;波前处理软件及PCI板为荷兰OKO公司开发的FrontSurfer 1.3.9版本。由于实验中不易观察到光源强度的变化,因此在CCD前放置了一

块2号鉴别率板对光强进行调制,更易于看到光束的变化,其最高分辨率为50 lp/mm。

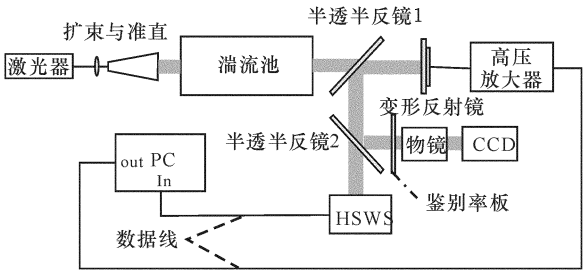


图2　实验装置示意图

Fig. 2　Schematic of experimental setup

3　实验结果

3.1　水中湍流对激光束波前的影响

在不开启变形反射镜闭环校正的情况下,测量了水中湍流对激光束波前的影响,此时变形反射镜仅相当于一面普通的反射镜。水中的湍流会引起光波波前的畸变,降低光束的质量。通常使用PV值和RMS值衡量波前畸变的程度。实验中,采用的是准直光束,理论上HSWS得到的波前应是平面波,但是由于光路中的透镜、水槽的玻璃壁、变形反射镜的面型等会不可避免地引入像差,波前传感器实际得到的波前并不是平面波。水槽充满清水后静置1 h后,用波前传感器测量波前,可以认为此时的波前即为系统的原始波前。经过多次测量,原始波前的PV值为1.8λ,起伏小于0.01λ;RMS值为0.26λ,起伏小于0.01λ。分别以约85 cm^3/s、130 cm^3/s、170 cm^3/s的速度向水槽中注入同样的清水,测量各状态下的波前。按时间顺序,连续采样并测量波前,取出各状态下具有代表性的一段时间内的统计结果。图3给出了波前PV值的测量结果,图4给出了RMS值的测量结果。由图中的数据测得3种状态下波前PV值的均值分别为1.767λ、1.810λ、1.631λ,波动范围分别为1.049λ、1.247λ、1.402λ;RMS值的均值分别为0.255λ、0.262λ、0.238λ,波动范围分别为0.109λ、0.140λ、0.167λ。由3组数据可以看到,波前的PV值和RMS值的变化没有明显的规律,PV值、RMS值的均值与静态值相差都不大,尤其是前两组,几乎是一样的,但是起伏范围却随着流速的增大而增大。实验中光束在水中的传播距离只有1 m,测得的光束波前PV值的起伏均超过1λ,RMS值的起伏均超过0.1λ,可见,水中的湍流对激光束的波前的传播有较大的影响。上述的结果仅考虑了水中的扰动的影响,尚未考虑水的密度、温度等因素的影响。当将清水注入浓度分别约为1.5%、3%、4.5%的盐水时产生湍流,测量波前的起伏。此时波前的起伏很大,对光波振幅的调制强烈,出现振幅为零的点,光波相位不连续,波前处理软件有时不能正确测量波前的变化。

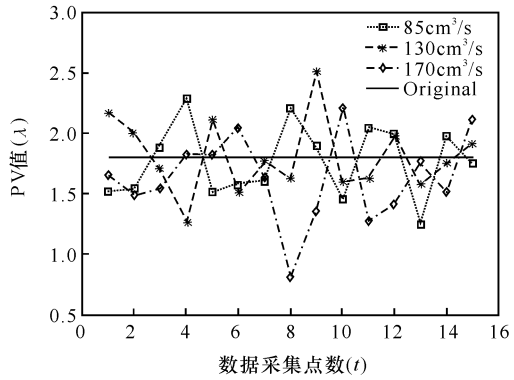


图3　PV值的起伏图

Fig. 3　PV value

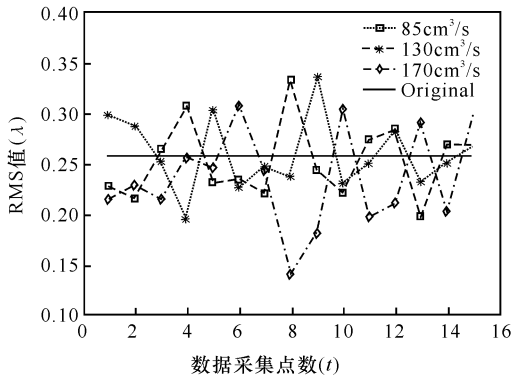


图4　RMS值的起伏图

Fig. 4　RMS value

3.2　水中湍流的特性

本文主要对湍流的湍流强度、时间相关性及其引起的波前畸变的组成等进行了研究。湍流强度可用湍流引起的波前畸变的大小表示,湍流的时间相关性可以通过波前畸变的相关性表现。当湍流引起的波前畸变的大小超出成像自适应光学系统的校正范围时,系统将失去作用。若湍流的时间相关性差,在系统的收敛时间内不能看成是准静态过程,系统也无法完成校正。在本实验中,分析水中湍流引起的波前畸变的方法是在一定的帧频下,以前一帧图像的波前为参考,分析后一帧图像波前相对于前一帧图像波前畸变的大小。在该方法中,帧周期与系统的收敛时间相近,只要相邻帧的相对波前畸变的大小在系统的校正范围内,理论上,系统都可以对畸变进行有效地校正。这样,对湍流强度和相关性的研究转换为对相对波前畸变大小的研究。

为了较全面地得到水中湍流的信息,将清水以

170 cm^3/s 的速度注入到 4.5%的盐水中,产生较强的湍流,待到湍流充分发展后,停止注水,在静止前对湍流的相关性进行分析。以 38 帧/s 的帧频记录波前,每隔 2 s 取连续的 17 帧波前图像进行相关分析,以分析结果的中间 10 项的平均值为一个数据点。畸变的PV 值、RMS 值的统计结果分别如图 5 和图 6 所示,其中纵坐标表示相对波前畸变的大小,横坐标是以时间为顺序的数据采集点数。图中的曲线有一个比较明显的特点,即曲线的局部起伏比较大,这主要是由于湍流是在水池中产生的,水池壁形成湍流的边界条件,对湍流的分布发展有较大的影响,此现象在池水接近平静时更为明显,如图中曲线的末尾部分所示,出现孤立的近似周期出现的波峰。

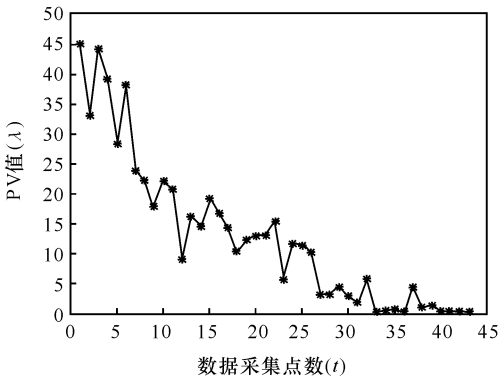


图 5　畸变波前的相对 PV 值

Fig. 5　Relative PV value of wave-front distortion

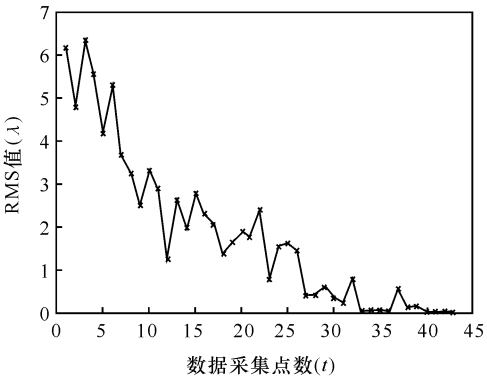


图 6　畸变波前的相对 RMS 值

Fig. 6　Relative RMS value of wave-front distortion

由图中的统计结果可见,湍流的变化发展不是线性的,且不同强度的水中湍流产生的相对波前畸变的大小有较大的差异。对于成像自适应光学系统来说,有一定的校正范围及收敛时间,同时实现大的校正范围和快的收敛时间是困难的,因此,自适应光学系统在水下的应用会受到限制。

对水中湍流引起的波前畸变进行 Zernike 分析。除去离焦(defocus)引起的像差,一个较为典型的波前畸变为4λ 的波前的前30 项Zernike 分解,如图7 所示。可见,在实验条件下,水中湍流引起的波前像差并不像空气中那样较明显地集中分布在较低阶的部分,但是低阶像差仍然占了较大的比例。

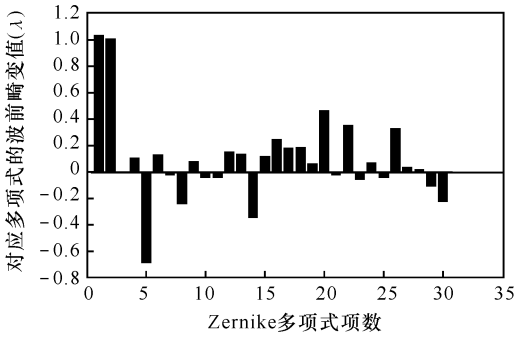
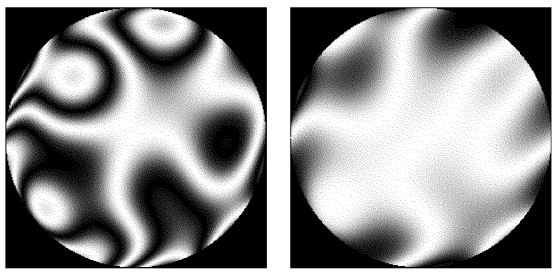


图 7　4λ 波前的前 30 项波前畸变的 Zernike 分解

Fig. 7　Zernike analysis of wave-front distortion

3.3　波前校正实验

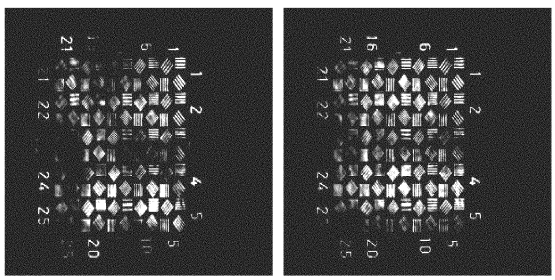
在闭环校正模式下,对相对于参考波前的畸变 PV 值、RMS 值分别为 2.995λ、0.426λ 的波前进行了校正,校正前后波前的干涉图及 CCD 接收到的鉴别率板的图像的变化分别如图8 和图9 所示。校正后的波前畸变的 PV 值、RMS 值分别减小到 1.205λ、0.157λ 左右。从CCD 接收到的鉴别率板的图像可以看到,校正前图像模糊且光强分布不均匀,校正后图像的质量有了改善。



(a) 校正前　　(b) 校正后

图 8　波前的干涉图

Fig. 8　Interference pattern of wave-front



(a) 校正前　　(b) 校正后

图 9　鉴别率板图像

Fig. 9　Resolution chart image

4　结论

水中湍流使激光束的波前相位产生了起伏,造成了水下图像分辨率的降低;水中湍流造成的波前畸变具有较大的范围,且波前畸变的Zernike分解不像空气中那样较明显地集中在低阶部分。由于畸变的范围较大,且高阶像差较大,因此,自适应光学在水下的应用受到水中湍流的强度及变形反射镜的校正范围和波前处理器的处理速度等因素的限制。对于在波前补偿系统补偿范围内的畸变,系统能较有效地校正波前的畸变,提高图像的分辨率,但结果较空气中差些。

本文的研究内容是对自适应光学在水下应用的有益尝试,为提高水下成像图像的质量提出了一种新的方法。同时,本文的思路也适用于水下激光通信系统的研究,为提高水下通信信号质量与精度提供了一种新的参考方法。

参考文献:

[1] 范伟,王毅,绕瑞中.可见到近红外波段整层大气光谱透过率的测量研究[J].光子学报,2006,35(3):402-407.
FAN Wei, WANG Yi, Rao Rui-zhong. Measurement of the atmospheric transmittance from visible to near infrared bands[J]. Acta Photonica Sinica, 2006,35(3):402-407. (in Chinese with an English abstract)

[2] 孙传东,陈良益,高立民,等.水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学,2000,21(4):39-46.
SUN Chuan-dong, CHEN Liang-yi, GAO Li-min, et al. Water optical properties and their effect on underwater imaging[J]. Journal of Applied Optics, 2000,21(4):39-46. (in Chinese with an English abstract)

[3] 黄有为,金伟其,王霞,等.凝视型水下激光成像后向散射光理论模型研究[J].光学学报,2007,27(7):1191-1197.
HUANG You-wei, JIN Wei-qi, WANG Xia, et al. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2007,27(7):1191-1197. (in Chinese with an English abstract)

[4] MCLEAN E A, BURRIS H R, STRAND M P. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water[J]. Applied Optics, 1995, 34(21): 4343-4351.

[5] 张德良,姜文汉,严海星,等.自适应光学对大气扰动波前的补偿效果研究[J].光学学报,1998,18(10):1366-1371.
ZHANG De-liang, JIANG Wen-han, YAN Hai-xing, et al. Compensation effect of an adaptive optics system for atmosphere induced wave-front perturbation[J]. Acta Optica Sinsca, 1998,18(10): 1366-1379. (in Chinese with an English abstract)

[6] 姜文汉.自适应光学技术[J].自然杂志,2006,28(1):7-13.
JIANG Wen-han. Adaptive optical technology[J]. Chinese Journal of Nature, 2006,28(1):7-13. (in Chinese with an English abstract)

[7] 叶嘉雄,余永林.自适应光学[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1992.
YE Jia-xiong, YU Yong-lin. Adaptive optics[M]. Wuhan: Huazhong Institute of Technology Press, 1992. (in Chinese)

[8] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. J. Opt. Soc. Am.,1976,66(3):207-211.

[9] FREEMAN R H, PEARSON J E. Deformable mirror for all seasons and reasons[J]. Applied Optics, 1982,21(4):580-588.

[10] SOLOVIEV O, VDOVIN G. Hartmann-shack test with random masks for modal wavefront reconstruction[J]. Optical Society of America, 2005,13(23):9570-9584.