



DOI: 10.12086/oe.2018.180233

水下湍流成像退化及优化恢复研究

谌雨章¹, 叶婷^{1*}, 程超杰¹, 杨婉璐²¹湖北大学计算机与信息工程学院, 湖北 武汉 430062;²华中科技大学计算机科学与技术学院, 湖北 武汉 430074

摘要: 为了全面且针对性地研究水下湍流成像的退化因素, 同时优化相应图像恢复算法, 搭建了一个可控湍流条件和重复使用的水下成像实验系统, 利用循环水泵控制实验水箱中湍流的强度, 气泡发生器制造微气泡, 图像传感器获取不同条件下的正弦条纹目标板的成像结果。研究了流速场、程辐射和流体介质对水下成像的影响, 结合图像复原和超分辨率重建技术, 比较了基于三种退化因素的调制传递函数(MTF)的差异和适用性。结果表明, 湍流流速场在低空间频率段造成 MTF 快速下降, 程辐射和流体介质则会导致高空间频率的调制对比度减小; 在水下湍流退化图像恢复中, 湍流流速场的 MTF 适合图像复原, 程辐射和流体介质的 MTF 适合图像重建。

关键词: 海洋光学; 调制传递函数; 图像复原重建; 超分辨率

中图分类号: P733.3+1; TP391.41

文献标志码: A

引用格式: 谌雨章, 叶婷, 程超杰, 等. 水下湍流成像退化及优化恢复研究[J]. 光电工程, 2018, 45(12): 180233

Degradation and optimal recovery of underwater turbulent imaging

Chen Yuzhang¹, Ye Ting^{1*}, Cheng Chaojie¹, Yang Wanlu²¹School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China;²School of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract: In order to comprehensively and objectively study the degenerate factors of underwater turbulent imaging and optimize the corresponding image restoration algorithms, a reusable submarine imaging experiment system with a controllable turbulent flow condition is established. The circulating water pump is used to control the intensity of turbulence in the laboratory tank. The bubble generator is used to generate micro bubbles. The image sensor is used to obtain the images of sinusoidal stripe target plates under different conditions. The effect of turbulent flow field, path radiation and fluid media on submarine imaging in turbulent flow were studied, and the differences and applicability of modulation transfer functions (MTFs) of three degradation factors are compared by combining image restoration and super-resolution reconstruction. The experimental results show that the turbulent flow field causes MTF declines of the low spatial frequency, and the path radiation and fluid media lead to the decrease of modulation contrast of the high spatial frequency. In the restoration of the underwater turbulent degraded image, the MTF of the turbulent flow field is suitable for image restoration, and the MTFs of the path radiation and fluid media are suitable

收稿日期: 2018-04-30; 收到修改稿日期: 2018-07-05

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目(Q20171010)

作者简介: 谌雨章(1984-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光电探测和图像处理的研究。E-mail: hubucyz@foxmail.com

通信作者: 叶婷(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事光电探测和图像处理方面的研究。E-mail: 630197027@qq.com

for image reconstruction.

Keywords: oceanic optics; modulation transfer function; image reconstruction-restoration; superresolution

Citation: Chen Y Z, Ye T, Cheng C J, et al. Degradation and optimal recovery of underwater turbulent imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(12): 180233

1 引言

上世纪 70 年代,光学湍流被提出是影响水下光学系统的因素之一^[1],到如今,水下成像技术已经被广泛地应用于水下地形勘测和水下地貌观测等领域。在自然静态水体中,悬浮颗粒的散射和吸收特性是造成水下图像退化的主要因素,这个影响因素使得水下可见范围最长才达到几十米,导致水下操作困难。在自然水体环境下,高频随机运动的湍流会对成像产生严重的影响,水下可见距离会进一步缩小,并导致水下成像质量降低,这与静态水体中的成像结果相差甚远。因此,深入研究水下湍流是很有必要的。

关于大气湍流的研究和技术都已经趋于成熟,相比之下,对水下湍流的关注较晚。大气的温度差异引起光束折射率的变化从而产生大气湍流效应。水下湍流跟大气湍流其相同点是两种湍流结构类似,不同点在于水下湍流是由水下温度和盐分密度改变引起折射率变化而产生。在研究湍流理论及其图像恢复处理领域,Hou 等^[2-6]利用水下成像退化模型,分别详细地分析了悬浮粒子、湍流和路径散射对水下光学成像的影响。Farwell 等^[7-8]结合海洋湍流功率谱模型,研究湍流对水下光束传输的强度和相干性分布,并且进行了大量的数值计算。Nootz 等^[9-11]搭建室内和室外的水下湍流实验系统,进行现场测量,用定量化的数据分析光学湍流对水下成像系统分辨率的影响。Matt 等^[12-13]建立了可改变性和可重复性的湍流环境实验平台,使用多普勒测速仪和粒子图像测速(PIV)系统分析流体场,利用计算流体动力学模型补偿测量结果,深入探讨了光学湍流的过程。孙立颖等^[14]搭建了流速可控的湍流实验系统,通过计算水下湍流的调制传递函数来分析水下湍流对成像结果的影响。蒲欢等^[15]讨论了海洋湍流的短曝光调制传递函数和大气湍流的长曝光调制传递函数的异同,并通过数值计算研究了海洋湍流对水下成像结果的影响。王马华等^[16]提出了改进湍流模型结合偏振的水下成像技术,利用折射率谱和湍流结构函数改进水下退化模型。杨爱萍等^[17-18]分析了不同波长在水中的吸收和散射,改进了基于 Jaffe-McGlamery 的水下成像模型,提高水下成像清晰度。从目前研究

水下湍流退化模型的文献来看,主要研究方法有三类,第一类是从湍流结构函数及散射特性出发进行理论计算;第二类是利用折射率功率谱构建实验系统,进行室内或室外的实验测量及分析;第三类则是基于 PIV 系统进行模拟实验测试。

现有的三大类研究方法侧重点不同,并且很少有文献将上述三类研究方法进行比较。本文通过搭建水下湍流的实验系统,针对三种模型分别提取和分析对应水下湍流退化的调制传递函数(modulation transfer function, MTF),讨论导致水下成像退化的主要因素。通过图像处理的直观和客观评价,对比分析三种模型的 MTF 在图像恢复中的适用性。

2 水下湍流退化调制传递函数

本论文提及的三种水下湍流退化模型的调制传递函数分别为湍流流速场造成的调制传递函数、程辐射造成的调制传递函数和湍流流体介质造成的调制传递函数。

2.1 湍流流速场造成的调制传递函数

从示踪粒子的跟随性和光散射特性等方面考虑,本文实验选择了水体中无污染的常见微粒气泡作为湍流流场的示踪粒子,利用 PIV 系统中粒子成像技术测量气泡流,从而得到水下湍流流速场分布。湍流流速场造成的调制传递函数即为气泡的运动调制传递函数。湍流水体中气泡的运动状态可以近似为匀速直线运动。

当运动目标相对图像传感器做匀速直线运动时会在靶面上产生相对位移 $s(t)$,目标物运动的线扩展函数(line spread function, LSF)可以用 $s(t)$ 的概率密度函数来描述,即运动调制传递函数可以通过概率密度函数获取。气泡运动位移的概率密度函数 $f_s(s)$ 可以用时间 t 的概率密度函数描述:

$$f_s(s) = f_t(t) \times \left(\frac{1}{|s'(t_1)|} + \frac{1}{|s'(t_2)|} + \dots + \frac{1}{|s'(t_n)|} \right), \quad (1)$$

式中: $f_t(t)$ 是时间 t 的概率密度函数,图像传感器的曝光时间 t 是一个服从均匀分布的随机变量,因此每个相对位移 s 对应的时间 t 的概率密度函数相等并且

均为 $1/t$ 。 $s'(t)$ 是相对位移 $s(t)$ 的导数。

匀速直线运动的相对位移为

$$s = v \times t, \quad (2)$$

式中 v 为气泡运动的速度大小，可以由气泡动力学方程估算。因此：

$$f_s(s) = f_i(t) \times \left(\frac{1}{|s'(t_1)|} + \frac{1}{|s'(t_2)|} + \dots + \frac{1}{|s'(t_n)|} \right) \\ = \frac{1}{t} \times \frac{1}{|v|} = \frac{1}{d}, 0 < x < d, \quad (3)$$

式中 d 为曝光时间内气泡和图像传感器之间的相对位移。

气泡的运动调制传递函数(MTF_{motion}，用 $F_{MTF-motion}$ 表示)可以通过相对位移的概率密度函数的一维傅里叶变换计算得到：

$$F_{MTF-motion}(f) = \frac{1}{d} \int_0^d \exp(-i2\pi fs) ds = \text{sinc}(\pi fd)。 \quad (4)$$

$F_{MTF-motion}(f)$ 是关于空间频率 f 和模糊距离 d 的 sinc 函数，空间频率 f 单位为 lp/mm。

2.2 程辐射造成的调制传递函数

海洋光学中用海水的光学传递函数(optical transfer function, OTF)来表征海水退化图像的模糊程度，其模糊程度取决于目标与背景之间的辐亮度和颜色的差别。程辐射是影响辐亮度的主要因素之一，因而通过对目标和背景之间的辐亮度分析就可以求解出程辐射造成的调制传递函数。在实验研究方面，光学传递函数具有可以直接测量的优点，因此可以使用固有频率目标分析法测量和计算调制传递函数。实验系统的目标板选择正弦条纹图像，忽略光的吸收和折射等损耗，平均光强不变，空间频率不变。

在光学传递函数理论中，调制度 M 定义为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

式中： I_{\max} 和 I_{\min} 分别为光强的最大值和最小值。

程辐射造成的调制传递函数(MTF_{path}，用 $F_{MTF-path}$ 表示)可由相同空间频率下像和物的调制度之比表示：

$$F_{MTF-path}(f) = \frac{M_i(f)}{M_o(f)}, \quad (6)$$

式中： f 为空间频率， $M_i(f)$ 和 $M_o(f)$ 分别为空间频率 f 下像和物的调制度。因为正弦条纹采用空间频率渐变的数据，所以像的调制度 $M_i(f)$ 可以通过计算采样数据的最大值和最值得到。在正弦条纹原始图片中，最大光强值为 255，最小光强为 0，所以 $M_o(f)$ 近似为 1。

2.3 流体介质造成的调制传递函数

在水下湍流的特定环境中，影响水下成像因素除了悬浮颗粒散射和程辐射外，湍流散射也是不可忽略的。湍流水体中流体介质的 MTF_{tur}(用 $F_{MTF-tur}$ 表示)是由悬浮颗粒散射的 MTF_{par}(用 $F_{MTF-par}$ 表示)和湍流散射的 MTF_{turscat}(用 $F_{MTF-turscat}$ 表示)相乘得到：

$$F_{MTF-tur} = F_{MTF-par} \times F_{MTF-turscat}, \quad (7)$$

其中： $F_{MTF-par}$ 和 $F_{MTF-turscat}$ 可分别表示为^[3,5]

$$F_{MTF-par}(\psi, r) = \exp \left\{ -cr + br \left[\frac{1 - \exp(-2\pi\theta_0\psi)}{2\pi\theta_0\psi} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$F_{MTF-turscat}(\psi, r) = \exp(-S_n \psi^{5/3} r), \quad (9)$$

式中： c 为衰减系数， b 为散射系数， r 为成像距离， θ_0 为平均散射角， ψ 为空间频率； $S_n = 3.44(\bar{\lambda}/R_0)^{5/3}$ ，其中 $\bar{\lambda}$ 为平均入射光波长， R_0 为特征参数。

3 水下湍流实验系统

为了分析和对比三种湍流退化模型，本文分别进行了室内模拟实验和海洋实地实验。在室内模拟实验中本文搭建了水下湍流实验系统，采用 532 nm 绿光半导体激光器作为光源，将气泡产生装置放在合适位置，用高清高速 COMS 图像传感器捕捉水下湍流图像，通过计算机对捕获图像进行处理。激光器采用型号为 HSCGS2290-532D200 的 HS 绿光半导体激光器，激光光斑大小为 10 mm~20 mm，光斑模式是点状模式，其功率可达 200 mW。实验水箱使用高透光率亚克力板制作，目的是让 90%以上激光源照射在目标板上，其尺寸为 150 cm×34 cm×33 cm(长×高×宽)。进出水口均为 40 mm 圆孔，水流采用高进低出的方式让水体更加容易形成湍流。水体循环需要外加压力，该实验系统中使用最大扬程为 5 m、最大流量为 7.8 m³/h 的循环泵提供水动力。实验系统立体结构如图 1 所示。

本文用水箱和水泵等器材搭建水循环系统，在水箱中模拟水下湍流的实验环境。电源接通后循环泵提供水动力，利用水体对流产生湍流，利用水阀控制水箱中湍流流速。光源和摄像机距离目标板 33 cm，为了降低实验误差，实验是在黑暗环境下进行。图 2 为水下湍流实验系统实物图。

为了研究水下湍流成像退化的主要因素，本文进行了室内模拟水下湍流实验，用雷诺数(Re)判断流体是否处于湍流状态。一般管道流场的雷诺数 $Re < 2300$ 时，为层流状态； $Re = 2300 \sim 4000$ 时，为过渡状态； $Re > 4000$ 时，为湍流状态。在管道直径一定条件下，

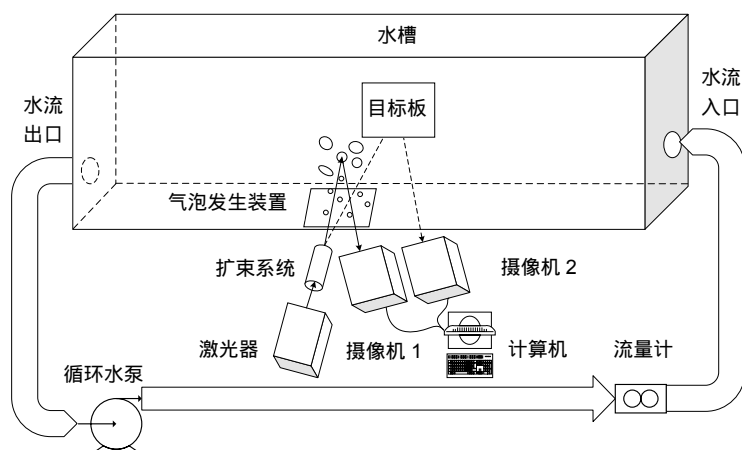


图 1 实验系统立体结构图

Fig. 1 Stereoscopic structure diagram of the experimental system



图 2 水下湍流实验系统实物图

Fig. 2 Physical map of underwater turbulence system

Re 与进水口处的水体流速有关,通过流量计和水泵水阀控制水体流速,使得流体状态为湍流。实验前制作多张空间频率不同的正弦条纹图像,在模拟的湍流场环境下,利用绿色激光器发出的光源,摄像机拍摄到水箱中不同区域的水下条纹图像。

在 PIV 实验部分,通过气泡装置产生的微气泡直径约 $50\ \mu\text{m} \sim 200\ \mu\text{m}$,从水箱底部上升到箱顶时间约 $8\ \text{s} \sim 136\ \text{s}$,密度小于自然水体。将 COMS 传感器获取的双帧单曝光的两张粒子成像图片划分网格,网格大小分别为 $32\ \text{pixels} \times 32\ \text{pixels}$ 和 $16\ \text{pixels} \times 16\ \text{pixels}$,对对应区域网格的像进行互相关算法,得到湍流流速的矢量图,从而计算气泡的运动调制传递函数。

4 实验结果与分析

为了对比研究三种水下湍流退化调制传递函数的适用性,分别将实验室内和实验室外的两种环境水下

退化图像进行图像处理。首先进行调制传递函数的分析,然后进行相应的图像恢复对比实验。用于图像处理的方法包含约束最小二乘滤波(constrained least squares filtering, LS)、盲解卷积(blind deconvolution, BD)图像复原技术和凸集投影法(projections onto convex sets, POCS)、基于 L1 范数的总变分^[19](L1-total variation, L1-TV)正规化图像超分辨率重建技术。LS 方法是在已知退化图像的部分信息、退化过程的系统函数和噪声特性等先验知识的前提下去追求图像最佳平滑效果。BD 方法是在无先验知识的情况下,根据极大似然准则去复原图像和模糊算子。POCS 方法是将先验知识作为约束,通过修正迭代算法重构图像。L1-TV 方法是将 L1 范数和正规化算法解的先验知识去约束重建过程中病态性问题,通过下降迭代算法重构图像。

为了客观地分析处理结果,本文选择无参照理想

图像的信息容量(information capacity, IC)、模糊度量(blur metric, BM)和灰度平均梯度(gray mean gradient, GMG)客观评价标准作为图像复原和重建的质量评估。水下实验现场存在很多不可忽略的因素,所以采集的水下湍流图像不是标准图像。常用的峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)和均方误差(mean square error, MSE)的传统评价标准并不适用于水下湍流图像质量评估。信息容量(IC)表征了图像有用信息的丰富程度;模糊度量(BM)描述了图像失真程度;灰度平均梯度(GMG)反映了图像边缘信息。其中 IC 和 GMG 的数值越大, BM 数值越小,图像复原和重建的效果越好。这些评价标准,已在本团队之前所发表文章中有详细叙述^[20], 本文不再赘述。

4.1 MTF 计算与分析

MTF 曲线可以表征水下湍流成像的退化过程。在室内水下模拟湍流实验中通过数值计算绘制出水下湍流的调制传递函数(MTF)曲线,如图 3 所示。实验中用于图像处理的 MTF 包括湍流速度场造成的调制传递函数 $F_{MTF-motion}$ 、程辐射造成的调制传递函数 $F_{MTF-path}$ 和流体介质造成的调制传递函数 $F_{MTF-tur}$ 。

从图 3 可以看出, $F_{MTF-motion}$ 曲线在 0~3 lp/mm 区间内呈现急骤下降趋势,在 3 lp/mm~9 lp/mm 区间随着空间频率增大而逐渐减小,在 9 lp/mm 之后波动极小,表明湍流流速场在低空间频率段是导致水下成像退化的主要因素。 $F_{MTF-path}$ 和 $F_{MTF-tur}$ 随着空间频率的增大而减小,变化趋势相似,因此在高空间频率段,程辐射和流体介质是图像退化的主要诱因。

为了验证上述结论,利用以上三种 MTF 对不同空间频率的图像进行盲解卷积图像复原,复原结果如图 4 所示。图 4(a)为不同空间频率的条纹图像,图 4(b)~4(d)分别是基于 $F_{MTF-motion}$ 、 $F_{MTF-path}$ 和 $F_{MTF-tur}$ 的图像盲复原图像。从主观评价上来看,对于低空间频率图像,基于 $F_{MTF-motion}$ 的图像复原效果较好,后两者的复原图像产生了边缘模糊和颜色偏移现象。对于高空间频率图像,图像复原效果与低空间频率情况相反。

图像质量评估采用灰度平均梯度(GMG)作为客观指标,其值越大,表示复原效果越好,评价结果如表 1 所示。

从表 1 的评价值中可以看出,在低空间频率基于 $F_{MTF-motion}$ 的复原结果指标较高,在高空间频率中,基于 $F_{MTF-path}$ 和 $F_{MTF-tur}$ 的复原结果指标则明显优于 $F_{MTF-motion}$ 。验证了湍流流速场是低空间频率段造成图像模糊的主要因子,而在高空间频率段,程辐射和流体介质则会导致调制对比度减小,是主要的退化因子。

4.2 室内实验——水下条纹退化图像处理

当水箱水域的雷诺数约 6000 时,在模拟湍流的实验水箱中获取水下退化条纹图像,基于三种水下湍流退化模型的图像处理结果如图 5 和图 6 所示。图 5 和图 6 为实验水箱下拍摄的湍流退化条纹图像的复原和重建结果。图 5(a)和图 6(a)为水下湍流退化的条纹图像,正弦条纹形状较清晰,图像上方因湍流已经模糊。图 5(b)~5(d)分别为采用不同 MTF 的 LS 方法复原的图像结果,用该方法复原的效果不理想,这是因为该方法在退化图像信噪比较低时会产生病态问题。

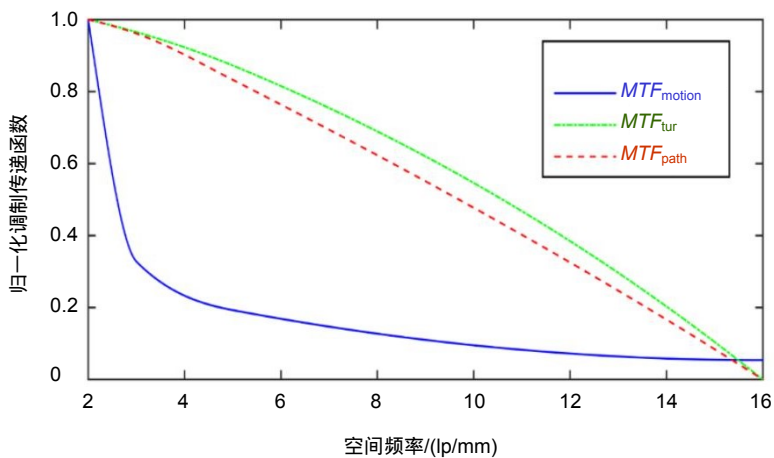


图 3 实验系统的 MTF 对比

Fig. 3 MTF comparison of experimental system

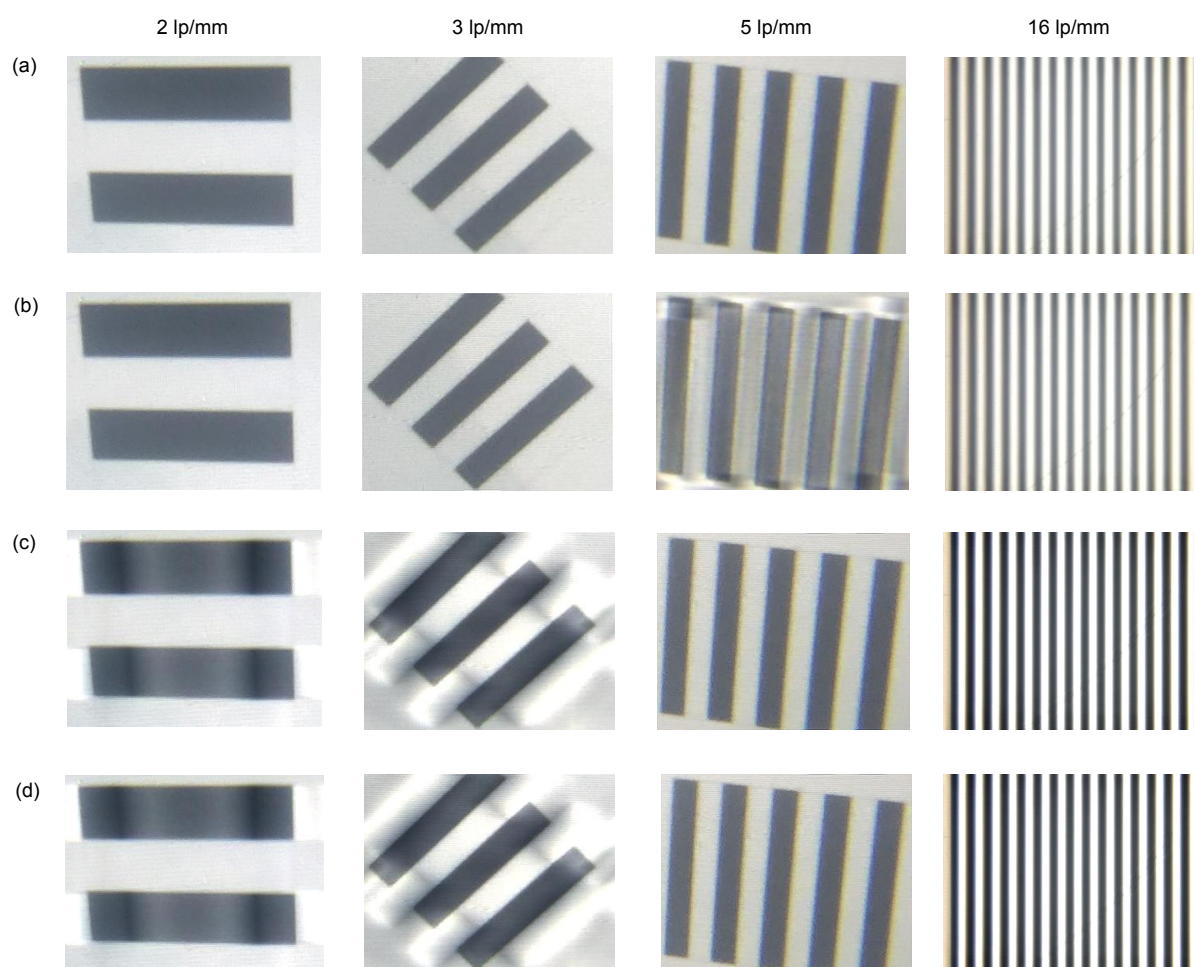


图 4 基于不同 MTF 的盲复原图像。(a) 不同空间频率的图像；(b) 基于 $F_{\text{MTF-motion}}$ 的盲复原图像；(c) 基于 $F_{\text{MTF-path}}$ 的盲复原图像；(d) 基于 $F_{\text{MTF-tur}}$ 的盲复原图像

Fig. 4 Blind restoration images of different MTFs. (a) Images of different spatial frequencies; (b) Blind restoration images of $F_{\text{MTF-motion}}$; (c) Blind restoration images of $F_{\text{MTF-path}}$; (d) Blind restoration images of $F_{\text{MTF-tur}}$

表 1 不同调制对比度盲复原图像的 GMG

Table 1 GMG of the blind restoration images of different MTFs

Spatial frequency of images /(lp/mm)	$F_{\text{MTF-motion}}$	$F_{\text{MTF-path}}$	$F_{\text{MTF-tur}}$
2	11360881	1189020	1189020
3	1615101	1102973	1102973
5	1267690	1557851	1557851
16	7047165	7226900	7226900

从主观评价上，基于 $F_{\text{MTF-motion}}$ 的复原图像颜色对比明显。图 5(e) ~ 图 5(g) 分别为采用不同 MTF 的 BD 方法复原的图像结果，用盲解卷积复原的效果则较为理想，从主观上看不出三幅图像的差异，因此需要客观评价标准进行准确的比较。

图 6(b) ~ 图 6(d) 分别为采用不同 MTF 的 POCS 方法超分辨率重建的图像结果，用该方法的重建效果理想，条纹清晰，从主观评价上，基于 $F_{\text{MTF-motion}}$ 的处理结果亮度较低，且边缘出现模糊，基于 $F_{\text{MTF-path}}$ 和 $F_{\text{MTF-tur}}$ 的重建结果亮度高，且边缘信息较为完整。

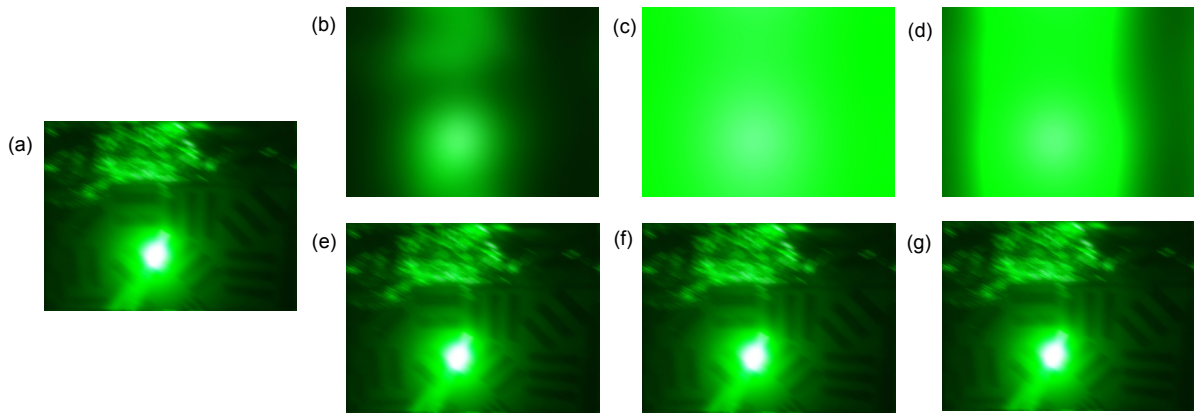


图 5 水下湍流条纹图像的复原结果。(a) 水下湍流条纹图像; (b) 基于 $F_{MTF-motion}$ 的 LS 方法; (c) 基于 $F_{MTF-path}$ 的 LS 方法; (d) 基于 $F_{MTF-tur}$ 的 LS 方法; (e) 基于 $F_{MTF-motion}$ 的 BD 方法; (f) 基于 $F_{MTF-path}$ 的 BD 方法; (g) 基于 $F_{MTF-tur}$ 的 BD 方法

Fig. 5 Reconstruction results of underwater turbulence stripe images. (a) Stripe image of underwater turbulence; (b) LS method of $F_{MTF-motion}$; (c) LS method of $F_{MTF-path}$; (d) LS method of $F_{MTF-tur}$; (e) BD method of $F_{MTF-motion}$; (f) BD method of $F_{MTF-path}$; (g) BD method of $F_{MTF-tur}$

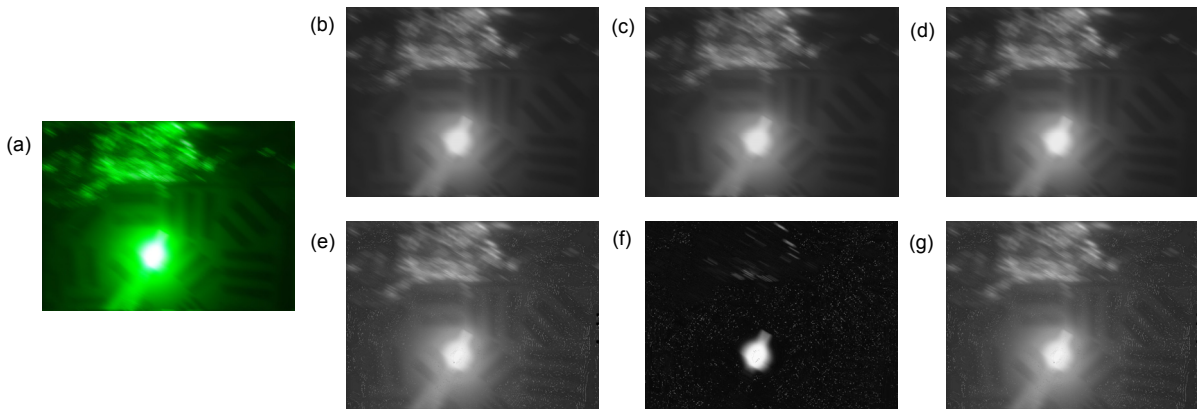


图 6 水下湍流条纹图像的超分辨率重建结果。(a) 水下湍流条纹图像; (b) 基于 $F_{MTF-motion}$ 的 POCS 方法; (c) 基于 $F_{MTF-path}$ 的 POCS 方法; (d) 基于 $F_{MTF-tur}$ 的 POCS 方法; (e) 基于 $F_{MTF-motion}$ 的 L1-TV 方法; (f) 基于 $F_{MTF-path}$ 的 L1-TV 方法; (g) 基于 $F_{MTF-tur}$ 的 L1-TV 方法

Fig. 6 Super resolution results of underwater turbulence stripe images. (a) Stripe image of underwater turbulence; (b) POCS method of $F_{MTF-motion}$; (c) POCS method of $F_{MTF-path}$; (d) POCS method of $F_{MTF-tur}$; (e) L1-TV method of $F_{MTF-motion}$; (f) L1-TV method of $F_{MTF-path}$; (g) L1-TV method of $F_{MTF-tur}$

图 6(e)~图 6(g)分别为采用不同 MTF 的 L1-TV 方法超分辨率重建的图像结果,基于 $F_{MTF-path}$ 的处理结果严重失真,但是水下气泡和激光点可以看到大致的形状,基于 $F_{MTF-tur}$ 的处理结果则较为理想。

图像处理结果的客观评价如表 2~表 3 所示。表 2 中图 5(b)的客观评价在其它方面均高于图 5(d)的情况下,其信息容量却低于图 5(d),这是因为 LS 方法在图像复原时产生病态问题,出现马赛克效应影响了图像

丰富程度。排除这些偏差,从表 2 的评价结果可以看出,基于 $F_{MTF-motion}$ 的 BD 方法, BM 值最小而 IC 和 GMG 的值最大,因此,可以得出结论,三因子中,湍流流速场的调制传递函数更适合图像复原。从表 3 的评价结果可以看出,基于 $F_{MTF-path}$ 的 POCS 方法和 $F_{MTF-tur}$ 的 L1-TV 方法,重建结果明显优于其他方法。因此,可以得出结论,程辐射和流体介质的调制传递函数更适合图像重建。

表 2 复原条纹图像的客观评价

Table 2 Objective evaluation of restored stripe images

Item	$F_{MTF-motion}+LS$ (Fig.5(b))	$F_{MTF-path}+LS$ (Fig.5(c))	$F_{MTF-tur}+LS$ (Fig.5(d))	$F_{MTF-motion}+BD$ (Fig.5(e))	$F_{MTF-path}+BD$ (Fig.5(f))	$F_{MTF-tur}+BD$ (Fig.5(g))
IC	6.6213	5.0278	6.4778	8.8601	6.8095	6.8095
BM	0.1368	0.111	0.156	0.0612	0.4144	0.3245
GMG	920613	249308	821285	5576436	2786888	2786888

表 3 超分辨率重建条纹图像的客观评价

Table 3 Objective evaluations of stripe images in super-resolution reconstruction

Item	$F_{MTF-motion}^+$ POCS (Fig.6(b))	$F_{MTF-path}^+$ POCS (Fig.6(c))	$F_{MTF-tur}^+$ POCS (Fig.6(d))	$F_{MTF-motion}^+$ L1-TV (Fig.6(e))	$F_{MTF-path}^+$ L1-TV (Fig.6(f))	$F_{MTF-tur}^+$ L1-TV (Fig.6(g))
IC	6.3721	9.6147	9.7786	7.4589	6.6690	9.1354
BM	0.1111	0.0368	0.0113	0.1071	0.0886	0.0136
GMG	1146400000	3400668600	62597149	1767000000	6601191	5136100000

4.3 实地实验——海洋鱼群退化图像处理

在南海水域中进行拍摄时，海洋水域的雷诺数与室内实验近似，基于三种水下湍流退化模型的图像处理结果如图 7~图 8 所示。图 7~图 8 为海洋水下拍摄的鱼群图像的复原和重建结果。图 7(a)和图 8(a)为海洋鱼群图像，海洋湍流导致图像模糊。图 7(b)~图 7(d)分别为采用不同 MTF 的 LS 方法复原的图像结果，

LS 方法依然存在着病态问题，图 7(e)~图 7(g)分别为采用不同 MTF 的 BD 方法复原的图像结果。图 8(b)~图 8(d)分别为采用不同 MTF 的 POCS 方法超分辨率重建的图像结果，图 8(e)~图 8(g)分别为采用不同 MTF 的 L1-TV 方法超分辨率重建的图像结果。图像处理结果的客观评价如表 4~表 5 所示。从客观评价结果可以得到和室内条纹图像成像一致的结论。

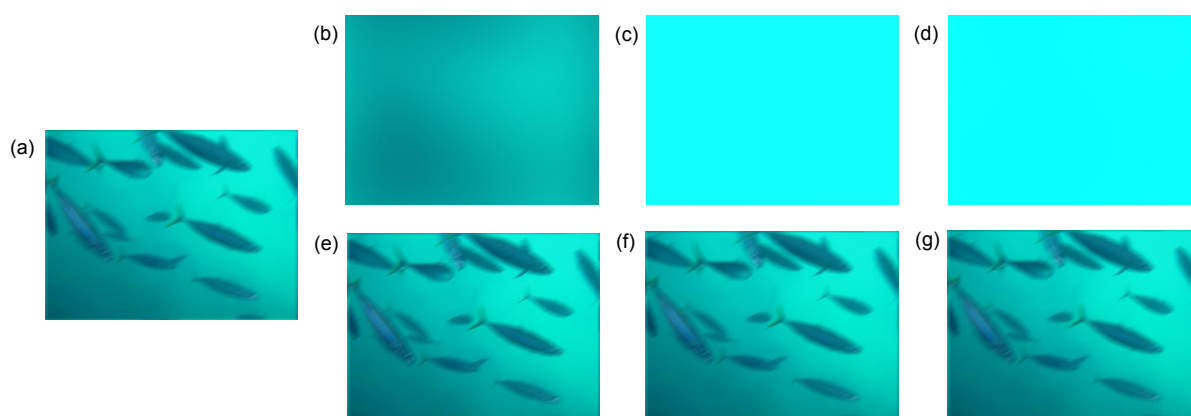


图 7 海洋鱼群图像的复原结果。(a) 海洋鱼群图像；(b) 基于 $F_{MTF-motion}$ 的 LS 方法；(c) 基于 $F_{MTF-path}$ 的 LS 方法；(d) 基于 $F_{MTF-tur}$ 的 LS 方法；(e) 基于 $F_{MTF-motion}$ 的 BD 方法；(f) 基于 $F_{MTF-path}$ 的 BD 方法；(g) 基于 $F_{MTF-tur}$ 的 BD 方法

Fig. 7 Reconstruction results of sea fishes images. (a) Sea fishes image; (b) LS method of $F_{MTF-motion}$; (c) LS method of $F_{MTF-path}$; (d) LS method of $F_{MTF-tur}$; (e) BD method of $F_{MTF-motion}$; (f) BD method of $F_{MTF-path}$; (g) BD method of $F_{MTF-tur}$

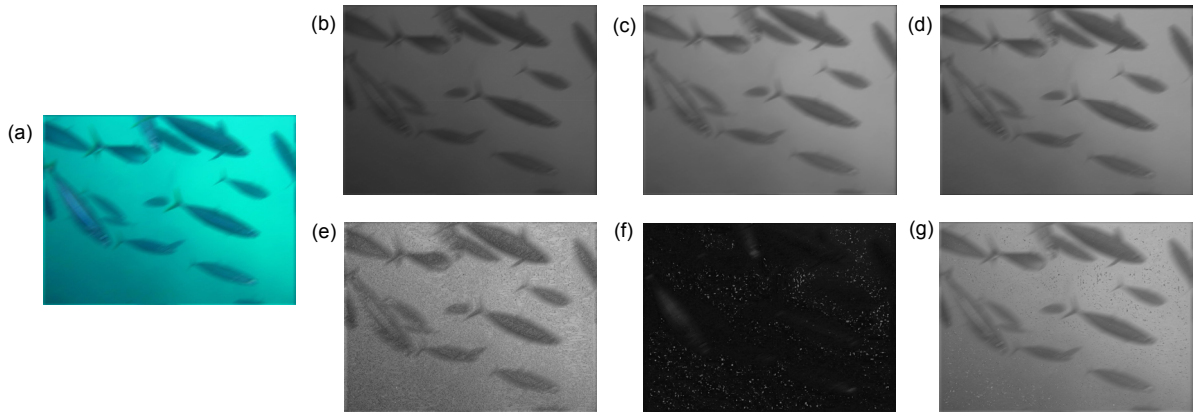


图 8 海洋鱼群图像的超分辨率重建结果。(a) 海洋鱼群图像; (b) 基于 $F_{MTF-motion}$ 的 POCS 方法; (c) 基于 $F_{MTF-path}$ 的 POCS 方法; (d) 基于 $F_{MTF-tur}$ 的 POCS 方法; (e) 基于 $F_{MTF-motion}$ 的 L1-TV 方法; (f) 基于 $F_{MTF-path}$ 的 L1-TV 方法; (g) 基于 $F_{MTF-tur}$ 的 L1-TV 方法

Fig. 8 Super resolution results of sea fishes images. (a) Sea fishes image; (b) POCS method of $F_{MTF-motion}$; (c) POCS method of $F_{MTF-path}$; (d) POCS method of $F_{MTF-tur}$; (e) L1-TV method of $F_{MTF-motion}$; (f) L1-TV method of $F_{MTF-path}$; (g) L1-TV method of $F_{MTF-tur}$

表 4 复原鱼群图像的客观评价

Table 4 Objective evaluation of restored sea fish images

Item	$F_{MTF-motion+LS}$ (Fig.7(b))	$F_{MTF-path+LS}$ (Fig.7(c))	$F_{MTF-tur+LS}$ (Fig.7(d))	$F_{MTF-motion+BD}$ (Fig.7(e))	$F_{MTF-path+BD}$ (Fig.7(f))	$F_{MTF-tur+BD}$ (Fig.7(g))
IC	5.5455	0.6311	0.8561	6.6668	4.6567	4.6567
BM	0.1152	0.1425	0.1111	0.0311	0.5755	0.5755
GMG	170666	2642	3916	122802	1046691	1046691

表 5 超分辨率重建鱼群图像的客观评价

Table 5 Objective evaluations of sea fishes images in super-resolution reconstruction

Item	$F_{MTF-motion+}$ POCS (Fig.8(b))	$F_{MTF-path+}$ POCS (Fig.8(c))	$F_{MTF-tur+}$ POCS (Fig.8(d))	$F_{MTF-motion+}$ L1-TV (Fig.8(e))	$F_{MTF-path+}$ L1-TV (Fig.8(f))	$F_{MTF-tur+}$ L1-TV (Fig.8(g))
IC	4.9063	6.4578	6.5512	7.5888	5.3496	9.3000
BM	0.2119	0.1730	0.0821	0.1091	0.0873	0.0241
GMG	49262650	60496856	59643527	449843653	142110023	867582194

5 结 论

本文在室内和室外均进行了水下湍流退化实验，实验过程中保持自然水域和海洋水域中流体的雷诺数相近。在室内根据湍流的特性搭建了一个模拟水下湍流环境的实验平台，通过控制进出口处水域的流速保

证了流体运动为湍流状态，使用 COMS 摄像机采集湍流退化图像。利用退化图像计算绘制出湍流流速场的调制传递函数、程辐射的调制传递函数和流体介质的调制传递函数曲线，通过 MTF 曲线衰减趋势分析了影响水下成像的主要因素。利用图像复原和超分辨率重建技术对退化图像进行处理，通过图像客观评价指

标比较研究了基于三种退化因素的水下湍流模型。

在湍流水体中,湍流流速场、程辐射和流体介质共同影响着水下成像过程。湍流流速场会造成低空间频率的调制传递函数快速下降,在高空间频率上,程辐射和流体介质造成的调制传递函数曲线衰减程度较大。

在优化恢复图像处理中,基于湍流流速场的调制传递函数的图像复原结果,以及基于程辐射、湍流流体介质的调制传递函数的图像超分辨率结果,相较于同类其他方法,信息容量和灰度平均梯度数值较大、模糊度量数值较小。可以得出结论,三种退化因子中,湍流流速场的调制传递函数更适合图像复原,程辐射和流体介质的调制传递函数更适合图像重建。

参考文献

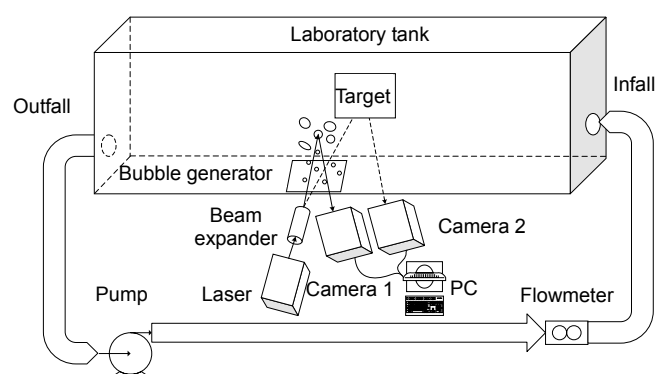
- [1] Gilbert G D, Honey R C. Optical turbulence in the sea[J]. *Proceedings of SPIE*, 1971, **24**: 49–56.
- [2] Hou W L, Lee Z, Weidemann A D. Why does the Secchi disk disappear? An imaging perspective[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(6): 2791–2802.
- [3] Hou W L, Gray D J, Weidemann A D, et al. Comparison and validation of point spread models for imaging in natural waters[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(13): 9958–9965.
- [4] Hou W L. A simple underwater imaging model[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(17): 2688–2690.
- [5] Hou W L, Jarosz E, Woods S, et al. Impacts of underwater turbulence on acoustical and optical signals and their linkage[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(4): 4367–4375.
- [6] Hou W L, Woods S, Jarosz E, et al. Optical turbulence on underwater image degradation in natural environments[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(14): 2678–2686.
- [7] Farwell N, Korotkova O. Intensity and coherence properties of light in oceanic turbulence[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(6): 872–875.
- [8] Farwell N H, Korotkova O. Multiple phase-screen simulation of oceanic beam propagation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9224**: 922416.
- [9] Nootz G, Hou W L, Dalgleish F R, et al. Determination of flow orientation of an optically active turbulent field by means of a single beam[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(13): 2185–2187.
- [10] Nootz G, Jarosz E, Dalgleish F R, et al. Quantification of optical turbulence in the ocean and its effects on beam propagation[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(31): 8813–8820.
- [11] Nootz G, Matt S, Kanaev A, et al. Experimental and numerical study of underwater beam propagation in a Rayleigh-Bénard turbulence tank[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(22): 6065–6072.
- [12] Matt S, Hou W L, Woods S, et al. A novel platform to study the effect of small-scale turbulent density fluctuations on underwater imaging in the ocean[J]. *Methods in Oceanography*, 2014, **11**: 39–58.
- [13] Matt S, Hou W L, Goode W, et al. Introducing SiTTE: a controlled laboratory setting to study the impact of turbulent fluctuations on light propagation in the underwater environment[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(5): 5662–5683.
- [14] Sun L Y, Xia M, Han J F, et al. Research of modulation transfer function of underwater imaging system in turbulent environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(8): 0801002.
孙立颖, 夏珉, 韩捷飞, 等. 湍流环境中水下成像系统的调制传递函数研究[J]. *光学学报*, 2016, **36**(8): 0801002.
- [15] Pu H, Ji X L. Problems of optical imaging in oceanic turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(10): 1026014.
蒲欢, 季小玲. 海洋湍流中光学成像相关问题研究[J]. *光学学报*, 2016, **36**(10): 1026014.
- [16] Wang M H, Zhao Z M, Wang S H, et al. Restoring method for underwater degraded images based on improved turbulence model and polarization imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(S1): 203–209.
王马华, 赵正敏, 王士湖, 等. 基于改进湍流模型和偏振成像技术的水下退化图像复原方法[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(S1): 203–209.
- [17] Yang A P, Zhang L Y, Qu C, et al. Underwater images visibility improving algorithm with weighted L_1 regularization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, **39**(3): 626–633.
杨爱萍, 张莉云, 曲畅, 等. 基于加权 L_1 正则化的水下图像清晰化算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, **39**(3): 626–633.
- [18] Yang A P, Qu C, Wang J, et al. Underwater image visibility restoration based on underwater imaging model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, **40**(2): 298–305.
杨爱萍, 曲畅, 王建, 等. 基于水下成像模型的图像清晰化算法[J]. *电子与信息学报*, 2018, **40**(2): 298–305.
- [19] Jin X J, Deng Z L. Super resolution reconstruction based on L_1 -norm and orthogonal gradient operator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(2): 305–312.
靳晓娟, 邓志良. 基于 L_1 范数和正交梯度算子的超分辨率重建[J]. *应用光学*, 2012, **33**(2): 305–312.
- [20] Chen Y Z, Yang W L, Tan H Y, et al. Image enhancement for LD based imaging in turbid water[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(2): 517–521.

Degradation and optimal recovery of underwater turbulent imaging

Chen Yuzhang¹, Ye Ting^{1*}, Cheng Chaojie¹, Yang Wanlu²

¹School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China;

²School of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China



Stereoscopic structure diagram of the experimental system

Overview: At present, the related researches of underwater turbulence mainly include three major categories. The first category is the theoretical calculation based on turbulent structure function and scattering properties. The second category is to use the refractive index power spectra to construct experimental systems for indoor or outdoor experimental measurements and analysis. The third category is the simulation testing based on the PIV system. The existing three categories of research methods have different emphases, and few literatures compare them.

In order to comprehensively and objectively study the degenerate factors of underwater turbulent imaging and optimize the corresponding image restoration algorithms, a reusable submarine imaging experiment system with a turbulent flow controllable condition is established. The circulating water pump is used to provide water force, and the water valve is used to control the turbulent flow field in the laboratory tank. The bubble generator is used to generate micro bubbles, and the bubbles is used as tracer particles. Image sensor is used to obtain the images of sinusoidal stripe target plates under different conditions. In order to reduce the experimental error, the experiment is conducted in a dark environment.

Through indoor and outdoor field experiments, the effect of turbulent flow field, path radiation and fluid media on submarine imaging in turbulent flow are studied. The modulation transfer function (MTF) of the underwater turbulence degradation is correspondingly extracted and analyzed for the three models. The adaptation performance and advantages of the three MTFs are compared and analyzed by using several typical image processing algorithms in turbulent image restoration and super-resolution reconstruction. The objective evaluation criteria such as information capacity (IC), blur metric (BM), and gray mean grads (GMG) are used to compare the objective effect of image processing. The experimental results show that the turbulent flow field, path radiation and fluid media affect the underwater imaging process in turbulent water. The turbulent flow field is the main factor that causes the degradation of underwater imaging in the low spatial frequency. The path radiation and fluid media are the main causes of image degradation. In the restoration of the underwater turbulent degraded image, the MTF of the turbulent flow field is suitable for the image restoration, and the MTFs of the path radiation and turbulent fluid media are suitable for the image super-resolution reconstruction. Compared with other methods of the same class, the information capacity and the gray mean grads value are larger and the blur metric value is smaller.

Citation: Chen Y Z, Ye T, Cheng C J, *et al.* Degradation and optimal recovery of underwater turbulent imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(12): 180233

Supported by Research Project of Hubei Provincial Department of Education in China (Q20171010)

* E-mail: 630197027@qq.com