

水下目标自然光偏振成像的研究

曹念文 张玉钧 王锋平 许克军 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘 要 采用白炽灯作光源, 面阵 CCD 作探测器, 用圆偏振和线偏振技术并且改变光源能量对水下目标进行成像. 通过比较图像清晰度表明用自然光照明无论是采用圆偏振技术还是采用线偏振技术都可提高水下目标成像的清晰度和成像距离, 且当偏振条件一定时适当提高光源强度能使图像变得更清晰.

关键词 线偏振, 圆偏振, 图像清晰度

1 引 言

水下成像是一项很有意义的工作, 由于水粒子的吸收和散射导致图像模糊不清^[1], 如何除去粒子散射光的干扰是问题的主要矛盾, 通常用 532 nm 激光作光源采用时间选通方法^[2]和偏振成像技术^[3]对水下目标进行成像. 虽然 532 nm 激光是海水窗口, 很少被吸收, 但由于激光光斑小, 照射的面积小而且激光能量不易提高, 用自然光成像不但可以克服这些缺点, 而且光源造价不高, 很容易提高它的能量以增大成像距离和提高图像清晰度. 本实验研究用白炽灯做光源, 用圆偏振和线偏振方法来提高图像质量.

2 水下目标成像模糊的原因分析

由于水粒子的吸收和散射导致水下目标的成像模糊, 水粒子对光的吸收是入射光的能量被转换成其它能量形式导致入射光能量减弱, 照射到目标上的光能量和探测器接受到的光能量都将减小, 这样就影响了成像距离. 如果没有光散射仅有光吸收存在, 可以通过增大照明光源的能量和提高探测器的灵敏度来提高成像距离. 水粒子散射导致光向周围散射使目标的反射光能量减小, 背景散射光增大, 这是引起目标反射光和背景散射光的能量清晰度减小, 并降低成像距离的主要原因. 从下列公式^[4]可以看出目标反射光和背景散射光的能量清晰度

$$c = \frac{E_1 - E_2}{E_2}, \quad (1)$$

其中 E_1 表示目标反射光能量, E_2 表示背景散射光能量.

$$E_2 = E_0 - E^\otimes, \quad (2)$$

其中 E_0 表示背景反射光能量, E^\otimes 表示光传输过程中的散射光能量.

把 (2) 代入 (1) 得:

$$c = \frac{E_1 - E_0 - E^\otimes}{E_0 - E^\otimes}. \quad (3)$$

由于 $E^{\otimes} \gg E_0$, E_0 可以忽略不计这样就得到:

$$c = \frac{E_1 - E^{\otimes}}{E^{\otimes}} = \frac{E_1}{E^{\otimes}} - 1. \tag{4}$$

从公式 (4) 可以看出稍微减小散射光能量 E^{\otimes} 就能使能量清晰度大大提高; 当成像距离增大时散射光能量 E^{\otimes} 就增大, 当成像距离增大到一定程度时能量清晰度 $c = 0$, 即目标图像湮没在散射光噪声中, 故探测器所能接收能量清晰度 c 的最小值 (灵敏度) 决定了最远的成像距离, 从公式 (4) 还可以看出当探测器接受能量清晰度 c 一定时, 增大光源能量 E_1 能使图像清晰度提高成像距离增大. 从上述可知: 采用什么方法减小散射光能量 E^{\otimes} 是我们的实验目的. 本文根据散射光的偏振特性利用圆偏振和线偏振技术来解决这个问题:

2.1 圆偏振技术

由于入射的右旋圆偏振光被水粒子散射后变成左旋圆偏振光, 这部分左旋圆偏振光被探测器前的右旋圆偏振器滤去即: $E^{\otimes} \approx 0$; 而入射的右旋圆偏振光被目标反射后, 一部分变成左旋圆偏振光, 另一部分的偏振状态不变, 仍然是右旋圆偏振光. 可以假设目标反射光, 一半是左旋圆偏振光, 另一半被探测器前的右旋圆偏振器滤去其中左旋圆偏振光, 只有右旋圆偏振光能通过偏振器进入 CCD 成像系统. 这样 (4) 式就变成:

$$c = \frac{E_1 - E^{\otimes}}{E^{\otimes}} = \frac{E_1}{E^{\otimes}} - 1 \approx \frac{E_1/2}{0} - 1 \approx \infty. \tag{5}$$

从 (5) 式可以看出用圆偏振成像技术能使图像清晰度大大提高.

2.2 线偏振技术

根据散射理论, 目标反射光的解偏振度远远大于水粒子散射光的解偏振度, 如图 1 所示 [5]. 在入射光路上放置水平方向的偏振器, 使入射光变成水平偏振光.

1) 当探测器前线偏振器的偏振方向为水平方向时, 目标反射光能量 E_1 和散射光能量 E^{\otimes} 大约相等即:

$$E_1 \approx E^{\otimes}. \tag{6}$$

把 (6) 式代入 (4) 式得:

$$c = \frac{E_1 - E^{\otimes}}{E^{\otimes}} = \frac{E_1}{E^{\otimes}} - 1 \approx 1 - 1 = 0. \tag{7}$$

从 (7) 式可见当探测器前线偏振器的偏振方向为水平方向时图像模糊不清.

2) 当探测器前线偏振器的偏振方向为垂直方向时, 目标反射光能量 E_1 远远大于散射光能量 E^{\otimes} 即:

$$E_1 \gg E^{\otimes}. \tag{8}$$

把 (8) 式代入 (4) 式得:

$$c = \frac{E_1 - E^{\otimes}}{E^{\otimes}} = \frac{E_1}{E^{\otimes}} - 1 \approx \infty - 1 = \infty. \tag{9}$$

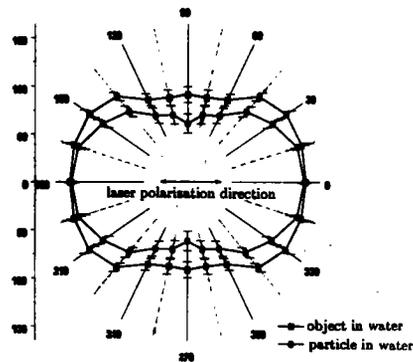


Fig.1 The different depolarization between the reflect light and the scattering light

从 (9) 式可见, 当探测器前线偏振器的偏振方向为垂直方向时, 图像清晰。

3) 无偏振器时, 散射光能量完全进入 CCD 成像系统, 可以认为:

$$E_1 = E^\otimes. \quad (10)$$

$$\text{同样存在 } c = \frac{E_1 - E^\otimes}{E^\otimes} = \frac{E_1}{E^\otimes} - 1 = 1 - 1 = 0. \quad (11)$$

从 (11) 式可见无偏振器时, 图像完全湮没在噪声中。

3 实验及结果分析

3.1 实验

用白炽灯作光源照射水下目标, 用光照度计测量入射光能量, 在入射光路上放置水平偏振的线偏振器在 CCD 前放置垂直偏振或水平偏振的线偏振器对水下目标进行成像; 或在入射光路上放置右旋圆偏振器在 CCD 前放置右旋圆偏振器或左旋圆偏振器对水下目标进行成像。用图像处理软件测出每幅图像中相对强度的最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} , 根据公式 (12) 算出图像清晰度。

$$\zeta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (12)$$

3.2 图像数据及其分析

根据计算的数值作出图像清晰度与偏振状态的变化关系图。

当自然光照度很小时 (图 2a)、总体来说图像清晰度很小, 最大值为 0.36, 因为本来很弱的光强经过水中粒子的散射和衰减后变得更弱, 尽管用三维图像数据作出的表面图可非常清晰的分辨目标, 但 CCD 探测器的图像显示软件则无法分辨。同样, 与激光成像一样, 右旋圆偏振成像的图像清晰度稍高于 90° 线偏振成像的图像清晰度, 说明水体较清时圆偏振方法优于线偏振方法。

随着照明光照度的增加, 无论哪种方法图像清晰度都增加。当光照度从 23.5 lx 增加到 48.2 lx 时, 图像清晰度增加接近一倍 (图 2b)。而右旋圆偏振的图像清晰度比无偏振器的图像清晰度也提高了一倍。此时 CCD 探测器的图像显示软件则可分辨目标形状。

随着光照度继续增大到 110 lx, 右旋圆偏振和 90° 线偏振的图像清晰度越来越大 (图 2c), 尽管左旋圆偏振和 0° 线偏振以及无偏振的图像清晰度也在增大, 但它们增加的幅度是不同的。

由于水中散射粒子的存在, 进一步增加光照度 (350 lx), 无偏振器的图像清晰度反而下降, 这说明光强很强时, 水粒子散射光增大的幅度比目标反射光增强的幅度要大 (图 2d), 350 lx 光照下无偏振器的图像清晰度为 0.568, 而且 110 lx 光照下无偏振器的图像清晰度为 0.652。从图可见, 随着光强的进一步增加, 这时的清晰度 ($c=0.568$) 小于以前的清晰度 ($c=0.652$), 还可以看出这时用圆偏振 (起偏检偏同为右旋) 成像清晰度增大的幅度 (这时的清晰度 $c=1.32$, 以前的清晰度 $c=1.059$, 两者之差为 0.27) 比用圆偏振 (起偏为右旋检偏为左旋) 成像的清晰度增大的幅度 (这时的清晰度 $c=0.762$, 以前的清晰度 $c=0.69$, 两者之差为 0.07) 要大得多 (前者为后者的 4 倍)。这进一步说明水粒子散射光中, 虽然存在的右旋光, 但是右旋光的含量很小, 远远小于左旋光的含量。即: 水体清晰, 水粒子的尺寸很小, 入射的右旋光经水粒子的散射后绝大部分变为左旋光, 只有极少数右旋光。

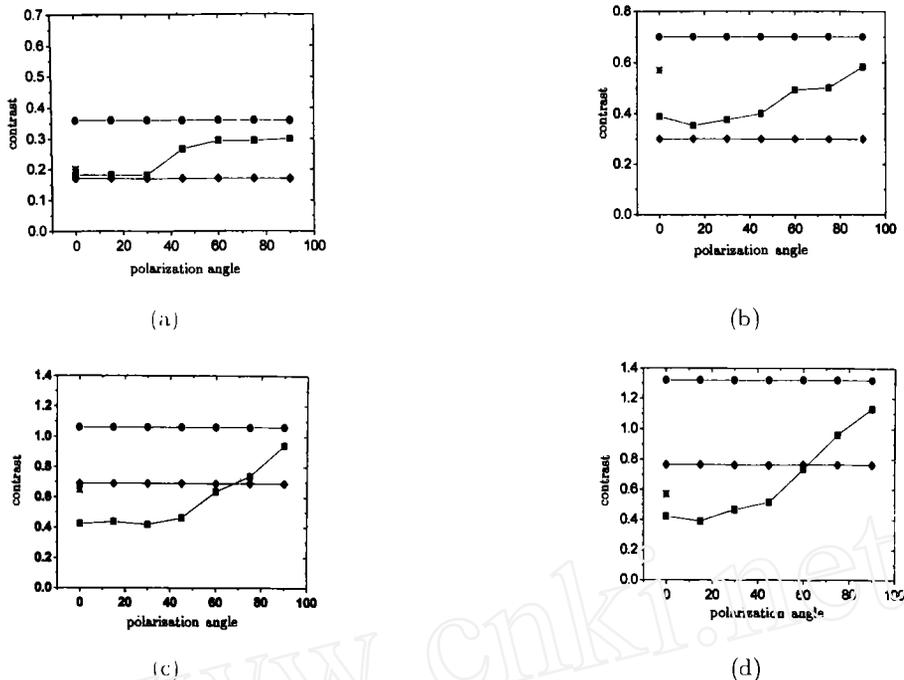


Fig.2 The different image construct under different polarization conditions and different illumination at 1.12 m attenuation length and 2.6 m imaging range. (a) illumination 23.5 lx, (b) illumination 48.2 lx, (c) illumination 110 lx, (d) illumination 350 lx . -■-liner polarization -●-right circular polarization -◆-left circular polarization -* without polarization

图 3 给出不同光照度、不同偏振条件图像清晰度的比较。当光照度较大时 (见图 3a), 有偏振器时的图像清晰度随着光照度的增大而增加, 其中 CCD 前用右旋圆偏振器时图像清晰度增大最快, 其次 90° 线偏振器, 此时检偏器的偏振方向与起偏器的偏振方向垂直。在光照度较大时 (大于 110 lx), 无偏振器时图像清晰度随光照度的增大而减小, 当光照度较小时, 不同条件下的图像清晰度相差不多, 且都较小即成像质量较差, 原因是光强太弱, 大部分光能量被水衰减或吸收, 进入探测器成像的能量很弱, 导致图像清晰度、亮度都很弱, 图像不清晰。

从图 3(b) 中可见图像清晰度基本上随光照度的增大而增大, 光照度较大时图像清晰度随光照度的变化较明显, 光照度较弱时不同条件下的图像清晰度都很小且相差不多, 这是由于光照度本身很小再加上水的散射和吸收导致进入 CCD 成像系统的光能量太弱的原因。当光照度较大时 1 态 (线偏振起偏器的偏振方向与检偏器的偏振方向相垂直) 和 4 态 (圆偏振起偏和检偏同为右旋) 对应的图像清晰度较大, 其中 4 态 (圆偏振起偏和检偏同为右旋) 对应的图像清晰度比 1 态对应的图像清晰度高, 说明用圆偏振器成像比用线偏振器成像要好。成像质量最差的是 2 态 (线偏振起偏和检偏的偏振方向相同) 和 3 态 (无偏振器) 对应的图像, 这是由于目标的反射光和水粒子的散射光同时进入 CCD 成像系统导致图像噪声很大图像不清晰, 其中 5 态 (圆偏振起偏为右旋检偏为左旋) 对应的图像质量比 1 态的图像质量差, 原因是水粒子散射引起的部分右旋光还能通过检偏器进入 CCD 成像, 即: 水粒子散射光没有完全被除去, 而且目标反射光中只有右旋光能通过检偏器进入 CCD 成像, 即: 部分左旋目标反射光不能通过检偏器成像, 也就是说: 目标反射光不能全部进入 CCD 成像系统而水粒子散射光又不能全部被除去导致

图像不清晰。

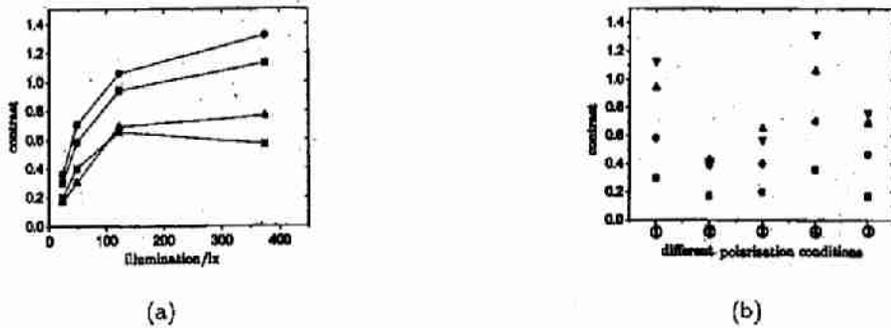


Fig.3 The comparison of image contrast between different polarization conditions and different illumination at 1.12 m attenuation length and 2.6 m image range.

(a) different illumination (b) different polarization conditions

①. linear polarization at 90° ②. linear polarization at 0° ③. linear polarization
④. right circular polarization ⑤. left circular polarization

图 4 为光照度 110 lx, 水体衰减长度 1.12 m, 成像距离 2.6 m 时得到的一组实测图像数据和用图像处理软件分析得到的一维强度分布图。

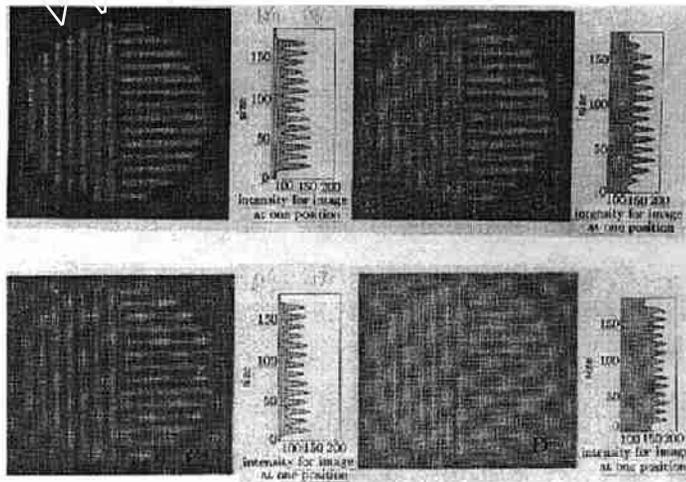


Fig.4 Images and their intensity for underwater objects under different polarization conditions, at 1.12 m attenuation length and 2.6 m image range and 110 lx illumination

(A) incident light is right circular polarization, a right circular polarizer is put in front of CCD.

(B) incident light is right circular polarization, a left circular polarizer is put in front of CCD.

(C) incident light is linear polarization, a perpendicular polarizer is put in front of CCD.

(D) incident light is linear polarization, a horizontal polarizer is put in front of CCD

从图 4 可以比较直观地看出, CCD 探测器前放置右旋圆偏振器和 90° 线偏振器得到的图像清晰度要好, 尽管整个图像的亮度可能低一些, 而 CCD 探测器前放置左旋圆偏振器和 0° 线偏振器, 由于无法消除水中粒子的散射影响, 造成图像的背景较大, 图像较模糊, 从一维相对强度分布图可以看出这一点。

4 结 论

如果影响水下光传输的散射过程能够消除, 那么影响成像清晰度限制成像距离的只是吸收过程, 采用更强的照明光源和更灵敏的探测器将大大提高成像质量和成像距离。

当 CCD 探测器前圆偏振器的旋光方向与入射光圆偏振的旋光方向相同时, 图像最清晰, 清晰度最大; 当 CCD 探测器前圆偏振器的旋光方向与入射光圆偏振的旋光方向相反时, 图像清晰度下降, 图像的清晰度仅与水粒子的浓度和目标本身散射特性有关; 当水粒子浓度较大时, 水粒子的散射光更强, 导致了清晰度下降。

根据所得到的实验结果来看, 探测器前无偏振器时的图像清晰度最差, 说明不论是采用圆偏振技术还是采用线偏振技术都能够有效地消除水粒子散射光对成像造成的影响, 能大大提高水下目标成像的图像清晰度和图像分辨率, 这说明用自然光照明采用偏振技术是一种有效的成像方法。

参 考 文 献

- 1 Mclean E A, Burris H R. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water. *Appl. Opt.*, 1995, 34(21): 4343
- 2 Kulp T J, Garis D. Development and testing of a synchronous-scanning underwater imaging system capable of rapid two-dimensional frame imaging. *Appl. Opt.*, 1993, 32(19): 3520
- 3 Demos S G, Alfno R R. Optical polarization imaging. *Appl. Opt.*, 1997, 36(1): 150
- 4 Gilbert G D, Pernicka J C. Improvement of underwater visibility by Reduction of Backscatter with a Circular Polarization Technique. *Appl. Opt.*, 1967, 6(4): 741
- 5 刘文清, 曹念文. 水下物体激光偏振成像研究. *量子电子学报*, 1997, 14(6): 520~526

White Light Polarization Imaging for Underwater Objects

Cao Nianwen Zhang Yujun Wang Fengping Xu Kejun Liu Wenqing

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica Hefei 230031)

Abstract Using white light as light source and using CCD as detector, the experiment of circular polarization and line polarization imaging for underwater object has been reported in this paper. By comparing the contrast of image, it is shown that either white light circular polarization technique or white light linear polarization technique can make the image for underwater object very clear and increase the contrast of image.

Key words linear polarzation, circular polarization, contrast of image

曹念文 男, 1967 年生. 1996 年在中科院安徽光机所获硕士学位, 学位论文获中科院大恒集团光学奖特别奖. 现在安徽光机所攻读博士学位. 主要从事激光器、拉曼散射、荧光光谱的研究, 在国内外发表论文数篇.