

像全息的水下应用

贾辉,张世强,陈晨,周朴何焰兰

(国防科技大学理学院,湖南长沙410073)

摘要:基于开发海洋事业的需要,对如何拍摄好水中物体的全息图进行了详细的理论分析,并利用像全息的方法成功拍摄到了一系列富有工艺美感的水下物体的全息图。针对拍摄的全息图进行了细致的定性、定量分析,最后对仪器开发和应用前景作了初步的探讨。

关键词:像全息; 信息光学; 水下全息

中图分类号: TB868; TB877 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)01-0118-04

Underwater application of image holography

JIA Hui, ZHANG Shi-qiang, CHEN Chen, ZHOU Pu, HE Yan-lan

(Institute of science, National University of Defense Technology, changsha 410073, China)

Abstract: According to the requirements of the project of ocean exploitation, the way of taking the hologram of objects underwater is analyzed in theory, and image holography is applied to getting a series of holograms, which are aesthetic successfully. And the holograms is analyzed in detail. Finally, the exploitation of instrument and the foreground of underwater holography are expected.

Key words: Image holography; Information optics; Underwater holography

0 引言

随着社会生产力的发展,向海洋进军已经成为了人类共同的口号。由于水体的吸收、散射、反射等一系列干扰因素,现有的普通光学仪器无法直接再现水中物体的真实面貌。这对海洋开发、海洋地质勘查、水下武器试验、水下目标侦察等重大课题产生了严重的影响。如何再现水中物体的真实面貌成为亟待解决的问题。基于全息技术能够真实地再现物体的三维结构,前人针对浮游生物特有的生理构造,利用光全息技术已经成功地拍摄了海洋浮游生物的全息图^[1]。但对于海底文物、海军作战武器(如潜艇)等透射性能远低于浮游生物、反射性能很强的物体的

全息拍摄,却没有相关报导。因此有必要对这一类物体全息图的拍摄进行深入探讨。

1 拍摄水中物体的理论分析

对于拍摄空气中物体的全息图,目前已经有很多比较成熟的方法,如普通的离轴全息、菲涅耳全息以及具有商业价值的彩虹全息等。但是水体作为一个特殊的拍摄环境,它对拍摄全息图会产生很多影响。主要表现在:水及水体中的杂质会对光的传输造成衰减;水体中的种种扰动(如声音、振动、水流等),都会破坏一般情况下拍摄全息图要求的光路稳定。

以上因素都会使得拍摄水中物体全息图比在空气中拍摄复杂、困难得多,因此有必要对上述因素进

行详细的定性与定量分析,以便选择合适的水下全息拍摄方式。

(1) 水及水体中的杂质对光的传输造成的衰减

由于干版对曝光量有一定的要求,因此与空气中拍摄不同,拍摄水中物体的全息图要考虑水体衰减因素的影响。对于特定的激光器和水体,根据干版曝光量的要求,都存在一个能够拍摄全息图的最大水体长度。根据参考文献[2]对衰减系数的定义,对该长度进行了定量分析。

对于曝光量,存在如下等式:

$$PTKe^{-cx} = ES \tag{1}$$

式中 P 为激光器的功率; T 为曝光时间; c 为水体的衰减系数; x 为水体的长度; k 为非水体衰减因子; E 为干版上的单位面积曝光量; S 为干版面积。

我们采用功率为 1.3 mW、波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器进行水下全息实验,采用的天津 I 型干版,曝光时间定为 6 s,根据参考文献[3]查得的最小值为 $14.55 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,干版面积为 20 cm^2 。考虑到拍摄物体和分束镜的因素,在不同的拍摄环境下, k 的取值不同。利用上述等式,在 k 取值不同的情况下,最大水体长度与衰减系数的关系如图 1 所示。

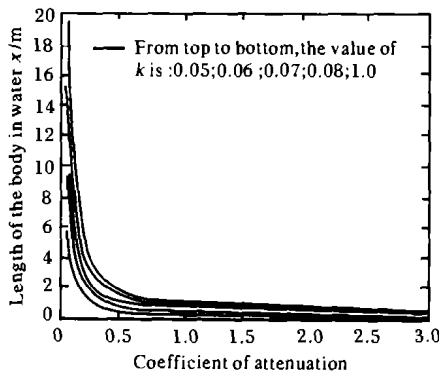


图 1 最大水体长度与衰减系数的关系图

Fig.1 Picture of the relationship between the length of the body and the attenuation coefficient

从图 1 可以看出,拍摄水中物体的全息图必须考虑水体衰减因素的影响。当衰减因素大于 3 时,必须增大激光器的功率才能实现水下全息拍摄。根据参考文献[2],深海水体的衰减系数只有 0.05 左右,这时最大水体长度是惊人的,因此利用水下全息的方法

必将会对海洋事业起巨大的促进作用。

(2) 水体中的种种扰动

为了简化起见,将物光和参考光都看成是点光源发出的,如图 2 所示^[3]。其中 O 点表示发出物光的点光源, R 点表示发出参考光的点光源。

假设 O 点的坐标是 (x_0, y_0, z_0) ,由全息图的物像关系^[3]可知,在成像平面上像点的坐标为:

$$x_i = \frac{x_c l_0 l_R \pm l_c (x_0 l_R - x_R l_0)}{l_0 l_R \pm l_c (l_R - l_0)}$$

$$y_i = \frac{y_c l_0 l_R \pm l_c (y_0 l_R - y_R l_0)}{l_0 l_R \pm l_c (l_R - l_0)} \tag{2}$$

式中 x_c, y_c 为再现光源的位置。

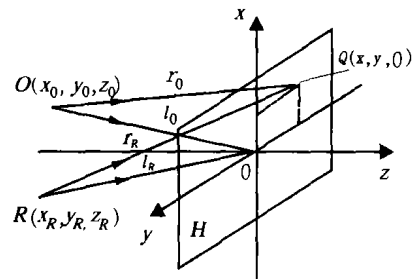


图 2 光场图

Fig.2 Diagram of light field

假设 O 点的坐标为 $(20, 0, -20)$,在 O 点的位置固定时,成像平面上的像点的坐标应该是 $(20, 0)$,所成的像是在 $(20, 0)$ 处的一个亮点。如果引入水体扰动的影响, O 点的坐标在原来的基础上叠加了一个随机波动。

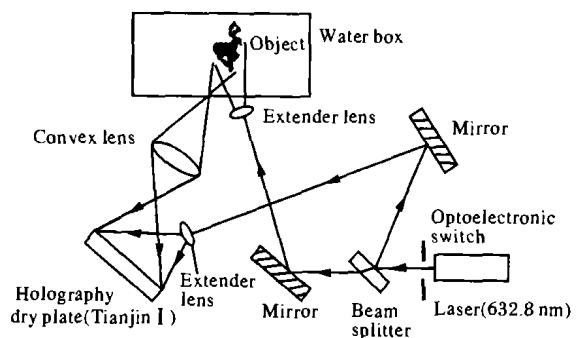


图 3 光路图

Fig.3 Diagram of the light route

采用一般的离轴全息会使水体的震动成为影响全息图质量的关键因素,由于像全息^[4]能够使物光波相对稳定,因此,我们采取像全息的拍摄方式,光路如图 3 所示。

2 像全息拍摄水中物体全息图的数学描述

下面从衍射积分的角度对像全息能否完整地反映物光的复振幅分布进行分析^[5],然后引入数学方程描述像全息的拍摄。

将像全息光路中采用的成像透镜看成一个傍轴成像系统,根据衍射积分及矩阵光学的有关知识,忽略透镜系统内部的衍射受限问题,根据光线传播的程函理论及菲涅耳衍射近似成立公式为^[6]:

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{\exp(ikl)}{i\lambda\beta} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \times \exp\left\{\frac{ik}{2B} [A(x_1^2 + y_1^2) + D(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1x_2 + y_1y_2)]\right\} dx_1 dy_1 \quad (3)$$

式中 l 为沿轴上的光程; $U_1(x_1, y_1)$ 为进入光学系统的光波的复振幅分布; $U_2(x_2, y_2)$ 为光波穿过光学系统后观察平面上的复振幅分布。

作变量代换 $x_a = Ax_1, y_a = Ay_1$, 化简得^[5]:

$$U(x, y) = \frac{\exp(ikl)}{i\lambda BA} \exp\left[i\frac{kc}{2A}(x^2 + y^2)\right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1\left(\frac{x_a}{A}, \frac{y_a}{A}\right) \times \exp\left[i\frac{k}{2BA}[(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2]\right] dx_a dy_a \quad (4)$$

值得注意的是,根据矩阵光学理论,成像透镜作为一个傍轴成像系统,其 $ABCD$ 矩阵中的元素 B 的值为 0, 上式存在分母为 0 的情形。参考文献[5]将这种情况视为 B 趋于 0 的极限情况,并推导出在 B 趋于 0 时积分运算的结果为:

$$U(x, y) = \frac{1}{A} U_1\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right) \quad (5)$$

上式就是按照几何光学传播规律确定的理想像光场。因此,像全息光路中的成像透镜能够完全再现物光场,并有着几乎不受外界震动干扰的特性,因此特别适用于水中物体全息图的拍摄。

我们可以将普通全息的理论应用于水下全息中,首先明确水下全息是在空气中拍摄全息的基础上加入了几种干扰因素:水作为相差介质;光在水体中传播的衰减;水体中的悬浮粒子。

设参考光和物光分别为:

$$R_0 \exp[i\psi(x, y)], O_0 \exp[i\theta(x, y)]$$

在水体中,水作为相差介质的干扰通过它的位相因子表现出来,设为 $R_0 \exp[ik(x, y)]$;光的衰减与水体长度 l 有关,设为 $\exp(-\alpha l)$;水体中的悬浮粒子会散射一部分激光,由于散射光不相干,因此它不干扰干涉过程,设散射光强为 B^2 。这样通过水体以后,参考光和物光分别为:

$$R_0 \exp[i\psi(x, y)] \exp[ik(x, y)], \\ O_0 \exp(-\alpha l) \exp[i\theta(x, y)] \exp[ik(x, y)] \quad (6)$$

为方便起见,计 $O_0 \exp(-\alpha l)$ 为 O_0' ,干板上记录的光场可以表示为:

$$B^2 + R_0^2 + O_0'^2 + R_0 O_0' \exp\{i[\psi(x, y) - \theta(x, y)]\} + \\ R_0 O_0' \exp\{-i[\psi(x, y) - \theta(x, y)]\} \quad (7)$$

当用参考光或白光光源再现时,作用于上式的第五项可以表示为:

$$R_0 \exp[i\psi(x, y)] \times R_0 O_0' \exp\{-i[\psi(x, y) - \theta(x, y)]\} = \\ R_0^2 O_0' \exp[i\theta(x, y)] \quad (8)$$

上式说明再现像就是原始的物光。在理论上证明了利用像全息拍摄水下物体的可行性。

3 实际水体环境的模拟

在实验室拍摄水中物体的全息图时引入了以下因素来模拟真实环境:

(1) 杂质浓度、振动、声音、温度场和水流等单因素干扰;

(2) 物光经过的水体长度不同;

(3) 拍摄反光度不同的物体(如金属、瓷器)。

具体的引入方法如下:

(1) 在水中加入不同浓度的悬浊液来模拟杂质浓度的干扰;

(2) 在水中加入混浊物来模拟悬浮粒子的干扰;

(3) 在拍摄的同时搅拌水体来模拟水流和声音的干扰;

(4) 在水中注入温水以模拟实际水中的温度场;

(5) 改变激光在水体中的传输路径来模拟物光

经过的不同的水体长度;

- (6) 拍摄硬币、瓷猪等反光性能差别很大的物体;
- (7) 上述模拟因素的综合考虑。

对于引入上述因素的不同情况,我们进行了大量的实验,成功拍摄了在不同因素的干扰下水中物体的全息图。结合理论的推导和实验的验证可以得出结论:水作为相差介质和水体的衰减因子并不影响干涉,只要水体系统的干扰没有完全淹没物光的信息,就能拍摄清晰的水下物体全息图。

4 实验

4.1 实验的基本环境

实验装置如图4所示。

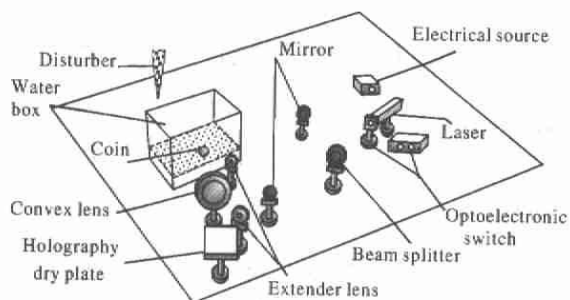


图4 实验装置图

Fig.4 Diagram of the experimental set

4.2 实验结果

图5为硬币原始图像,实验中还做了不同水体长度、水体浓度以及不同振动情况下的全息图,对瓷器样品也做了相应的实验。限于篇幅,只列出在温度为13.5°C、无混浊、水体长度为2.2 cm情况下的硬币全息图,如图6所示。



图5 硬币原始图像
Fig.5 Original image of coin

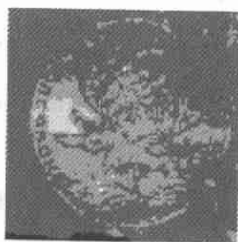


图6 水体长度为2.2cm时的硬币全息图
Fig.6 Holography of coin in 2.2 cm

从实验结果可以看出,利用像全息拍摄水中物体全息图可以获得良好的效果。同时全息图的质量也比参考文献[1]、[7]、[8]中展示的有较大程度的改善。

5 实验装置开发

基于“向海洋进军”的课题已经提上日程,因此开发出构造简单、操作方便的水下物体全息图的拍摄装置无疑有着巨大的实践意义。针对现有的全息光路设计了一种水下全息拍摄装置,如图7所示。图中,利用透镜和光纤的组合将物光引入密封仪器内部,这样既可以利用光纤实时调整光程差,又可以在仪器内部对水下物体进行实时全息拍摄,还可以根据实际情况采取不同的光路。相信这样的仪器会给海底勘测、文物探测等领域带来极大的便利。

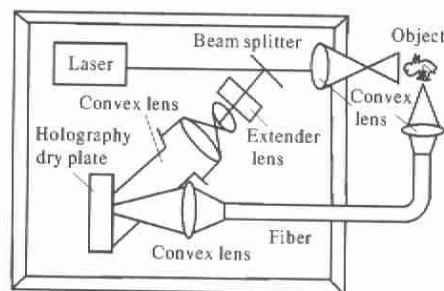


图7 水下全息拍摄装置图

Fig.7 Diagram of the holography of setting in water

参考文献:

- [1] Edwin Malkiel, Omar Alquaddoomi, Joseph Katz. Measurements of plankton distribution in the ocean using submersible holography[J]. Meas Sci Technol, 1999, 10: 1142-1152.
- [2] 陈养渭. 天然水体中激光衰减的现场测量[J]. 舰船科学技术, 2000, 1: 3-7.
- [3] 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [4] 苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] Collins S A. Laser-system diffraction integral written in terms of matrioptics[J]. J Optics, Soc Am, 1970, 60: 1168.
- [7] 张婷, 蒋旺, 何焰兰. 水下全息初探[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(11): 30-32.
- [8] Watson J, Rritton P W. Preliminary results on underwater holography[J]. Optics and Laser Technology, 1983, 15: 215.