

doi: 10.3788/lop47.031001

水下气泡场探测全息图的数字再现技术

王 添 于 佳 王金城 韩正英 郭春华 杨 宇

(中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要 针对水下环境, 探讨了数字全息术和图像处理技术在水下气泡场全息图的再现、识别和提取中的应用。首先完成数字全息记录及重现程序的编写并拍摄水下气泡场全息图, 对全息图进行去噪处理, 然后对处理过全息图进行再现, 利用边缘检测技术识别气泡并计算气泡大小, 用邻域再现法统计出全息图中的气泡数目, 实验证明这一方案切实可行。

关键词 数字图像处理; 水下环境; 气泡场探测; 数字再现

中图分类号 O436 OCIS 100.2000 100.3010 文献标识码 A

Technology of Digital Reconstruction in Detecting Hologram of Underwater Bubbles Field

Wang Tian Yu Jia Wang Jincheng Han Zhengying Guo Chunhua Yang Yu

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract The applications of digital holography and image processing technology in reconstructing, identificating and extracting hologram of underwater bubble field in the underwater environment are mainly discussed. First, the recording and reconstructing program is completed and used for recording the hologram of underwater bubbles field, and the hologram is denoised and reconstructed. Using edge detection techniques the bubbles are identified and their size are calculated. At last, using neighborhood reconstructing method the number of bubbles in the hologram is figured out. The project is proved practicable by the experiment.

Key words digital image processing; underwater environment; bubbles field detection; digital construction

1 引言

海洋中的气泡作为研究海洋与大气间能量交换的重点^[1,2]受到广泛关注。研究气泡的特性在流体动力学和物质交换^[3]、环境噪声^[4]、地球物理学^[5]、化学工程应用^[6]等方面都有重要的作用。海洋中的气泡主要是由波浪破碎产生的, 通常采用声散射方法^[7]和光学全息摄影方法^[8]来检测气泡的分布和粒径大小。光全息方法可对水体进行非介入式、非破坏性的探测, 是目前研究气泡的主要方法。然而, 水下环境作为一种区别于空气环境的特殊全息图拍摄环境, 它对拍摄全息图会产生很多影响^[8]。例如, 水体扰动对稳定性的影响、水作为均匀像差介质对全息图的影响、悬浮粒子和浮游生物的影响、水的折射率变化以及水的散射和吸收的影响等。近年来, 随着电子、数字技术的飞速发展, 数字全息技术的出现很好的解决了这个问题。本文基于这一背景, 提出利用数字全息技术对水下气泡场进行探测, 并通过数字再现技术对气泡进行再现、识别和统计的方法。

收稿日期: 2009-08-03; 收到修改稿日期: 2009-09-28

作者简介: 王 添(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事数字全息技术方面的研究。E-mail: wangtian19830686@163.com

导师简介: 王金城(1955—), 男, 硕士, 教授, 主要从事激光全息与数字图像技术等方面的研究。

E-mail: hololab@ouc.edu.cn (通信联系人)

2 水下数字全息实验及全息图的数字再现

在水下探测领域, 数字全息技术具有普通全息所无法比拟的优势, 该技术不仅能获得清晰的气泡场全息图, 而且通过对全息图进行后期的数字图像处理, 可以获得气泡的单体属性如边缘、粒径大小等, 这些都是研究海-气交换的重要参数^[9]。在数字再现中应用图像处理技术主要在于图像去噪。为了从图像中获取更准确的信息, 图像去噪算法的好坏成为后续处理的关键。图像去噪方法有时域和频域两种, 本文主要应用时域方法中的中值滤波^[10]以及小波分析消噪^[11]。边缘点指图像在该点的像素灰度值与其邻域点的像素灰度值相比有阶跃变化或屋顶变化的像素点的集合。这些点是图像最本质的特征之一, 可以指示出图像内各种物体的实际含量, 也恰是图像分析的信息所在。边缘检测^[12]就是对图像不同区域之间出现的不连续性进行检测并将其标出的技术。

2.1 水下气泡场全息图的拍摄

跟离轴全息术相比, 同轴全息术在光路布置上比较简单, 故在实际工作中比较容易实现。此外, 同轴光路也比较容易满足 CCD 所需要的参物光夹角限制, 这对实验是有利的。因此, 本实验采用同轴数字全息术进行气泡场的探测。

本文建立了一套数字全息系统, 通过在一个透明水槽生成气泡作为被摄物体, 来模拟海底气泡环境, 其系统原理如图 1 所示。实验中使用 He-Ne 激光器, 最大功率 80 mW, 波长 632.8 nm。聚焦透镜为直径 $D=25.4$ mm, 后焦距 $F=150$ mm 的平凸透镜, 有效通光孔径为直径的 90%, 其作用是将经过气泡场的平行光压缩成会聚光, 从而使 CCD 能记录下尽可能多的有效信息。所用 CCD 靶面尺寸为 12.8 mm \times 9.6 mm, 有效像素为 900 万, 经计算得知其像素大小为 3.65 μ m \times 3.65 μ m, 记录距离设置为 $d=30$ cm。

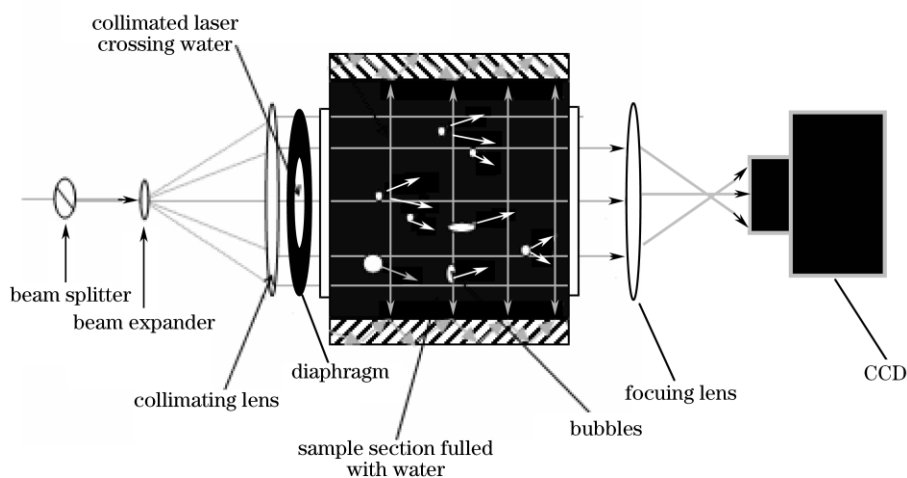


图 1 数字全息系统原理图

Fig.1 Principle of digital holographic system

用一束平面光波照明气泡场, 透过气泡场传播的光波被 CCD 记录。从全息术的角度来看, 经气泡衍射的光可以看作是物光, 没经过衍射的光可以看作是参考光, 记录面上得到的是物光波和参考光波的干涉条纹, 即全息图。通过以上实验系统进行拍摄, 获取水下气泡场全息图后, 开始进行全息图的再现、识别和提取工作。由于水下拍摄的全息图背景灰暗, 对比度和信噪比低, 因此, 需要利用数字图像技术对图片进行预处理才能研究其中有用的信息。

2.2 全息图的预处理

由于气泡和水的交界面对光线的反射明暗层次多, 且由于运动的关系, 气泡具有幅度和频率都较大的不规则变化, 所以拍摄的气泡照片往往难以区分水和气泡的边界; 另外摄取的图像无法避免噪声的干扰, 这些干扰因素的存在使图像的质量受到损害。图像的预处理可以有效抑制噪声, 突出有用信息, 从而提高

图片的实用价值^[9]。图像的去噪手段中低通滤波和去除不必要的噪声，本实验中主要采用中值滤波法和小波消噪两种技术手段达到这两个目的。

中值滤波法可以消除图像中的部分斑点和噪声，加强图像中气泡的边缘信息，是处理水下气泡图像的有效手段，通过 Matlab 软件编程实现中值滤波功能。小波去噪方法中最关键的是阈值的选取。本文采用目前比较经典的 VisuShrink 阈值选择法，通过 Matlab 编程实现此函数功能。利用中值滤波和小波去噪法去噪后图片如图 2 所示。

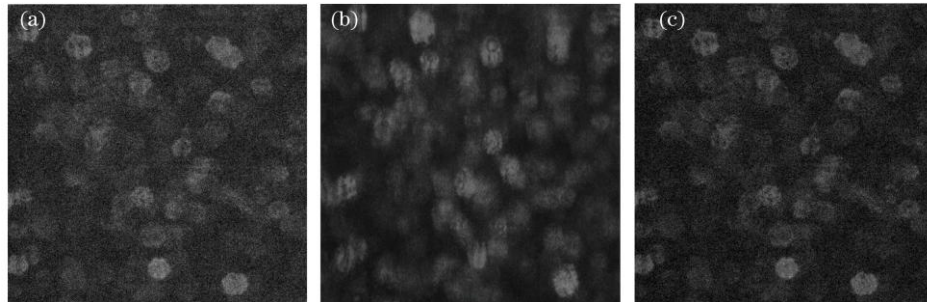


图 2 原全息图(a)，中值滤波去噪后全息图(b)和小波去噪后全息图(c)
Fig.2 Original hologram (a), median filter denoised hologram (b) and wavelet denoised hologram (c)

比较图 2(b)与(c)可知，两种去噪方法都比较有效地去除了噪声，但是应用中值滤波法更完美地保留了图像的细节，获取的气泡数目比应用小波变换的要多，因此在实验中选用中值滤波法去噪。

2.3 气泡场全息图的数字再现

通过选取最佳的去噪算法对全息图进行去噪以后，就可以对其进行再现，再现用的编程软件为 Matlab7.0，再现算法采用卷积再现法。之所以采用这一算法是因为利用卷积法进行再现不管距离如何变化，再现像的像素大小都不会改变，恒等于全息面的像素大小，即恒等于 CCD 的像素大小，相应的图像大小也不会发生变化。并且通过设置不同的再现距离，获得气泡场不同层面的再现图如图 3 所示。

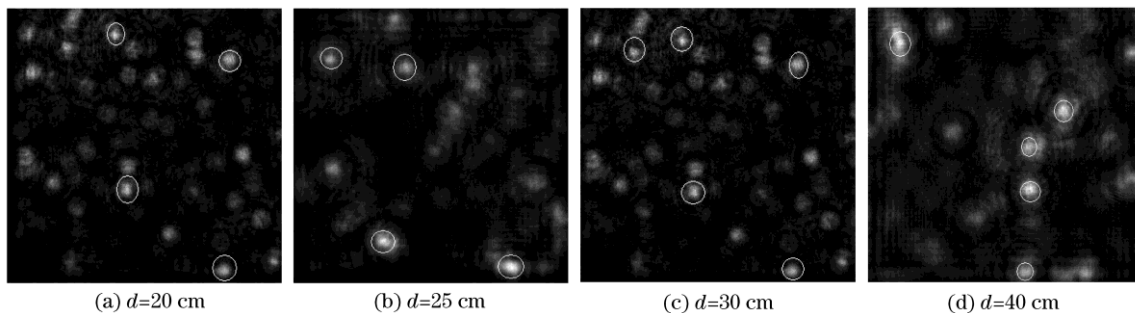


图 3 水下气泡数字全息图在不同再现距离下的再现图
Fig.3 Reconstruction of digital hologram of underwater bubbles in different reconstructing distances

2.4 气泡场全息图的边缘检测技术识别和提取

取全息图 3(a)和(b)中右下角两个气泡粒子来进行比较。图 3(b)为再现距离为 25 cm 时所获得的再现图像，可观察到边缘清晰的该气泡，说明此层面即为该气泡的焦平面。而在图 3(a)中该气泡仍然是模糊的，说明不在其焦平面上。图 3(c)中当再现距离为 30 cm 时，该气泡再次由于不在焦平面上而变为模糊。

在焦粒子与离焦粒子的主要区别在于在焦粒子边缘灰度梯度较大，离焦粒子边缘梯度较小^[13]。因此利用数字图像处理中的边缘检测技术，可以对气泡场再现图进行分析处理，检测出在焦气泡粒子并提取出来，这样即可得到某一层面的二维气泡场分布图，经过二值化处理的再现截面图如图 4 所示。

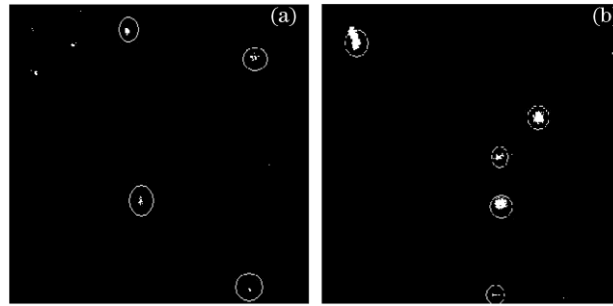


图4 水下气泡场再现截面图
Fig.4 Reconstructing sections of underwater bubble field

3 实验结果分析

对已经在焦的气泡,通过扫描法对气泡粒子沿横向和纵向扫描,得到粒子边缘的像素坐标差 $x_{\max} - x_{\min}$ 和 $y_{\max} - y_{\min}$, 然后分别乘以像素大小 Δx 和 Δy , 就可以得到粒子的直径尺寸^[8]。仍旧以图 4 中的右下角气泡粒子为例, 该气泡像素坐标差为 $x_{\max} - x_{\min} = y_{\max} - y_{\min} = 50$, 已知 $\Delta x = \Delta y = 3.65 \mu\text{m}$, 于是可得图 3(a) 的气泡直径为 $182.5 \mu\text{m}$ 。

吕且妮等^[14]提出了计算成像体中物体数目的一种方法。这种计算方法是再现所有平行于全息图平面的再现像, 两个相邻再现像面之间的间距要大于焦深, 再将这些再现像按强度分布相加。对于每一个粒子, 将在一个或几个平面聚焦, 而在其他平面而离焦, 所有这些再现像之和将在每一小物体附近产生相对较亮的区域。如果这个成像体中物体数目很少, 几乎没有物体之间的相互重叠, 这时亮点的数目近似等于成像体中物体的数目。实验中, 我们利用此方法来判断气泡场中气泡的数目。

首先由景深公式 $z_f = d^2/\lambda$ (其中 d 为粒子直径), 得景深 $z_f \approx 4.6 \text{ mm}$, 取再现间距为 5 mm , 获得多幅再现图像, 对其进行相加, 可得到气泡场粒子分布图如图 5 所示。由图知气泡场粒子数目为 28 个。为了验证该识别和提取气泡技术的准确性, 将提取气泡技术的结果与人工统计的实际气泡个数进行比较, 结果如表 1 所示。

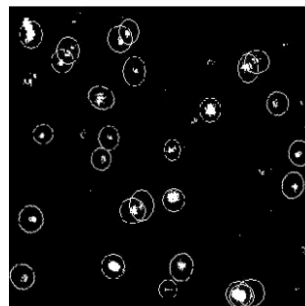


图5 气泡场各层面再现相加图
Fig.5 Superposition of all levels of construction of bubbles field

表1 水下气泡实验提取结果分析
Table 1 Extracting results of underwater bubbles experiment

Radius of bubbles /pixel	6	10	13	18	22
Experimental bubbles	11	6	6	3	2
Real bubbles	13	7	7	4	3

根据表 1 的结果, 提取到的气泡个数为 $11+6+6+3+2=28$ 个, 而实际气泡个数为 $13+7+7+4+3=34$ 个, 检测的正确率为 82.3% 。造成误差的原因是由于水中的气泡有许多是重叠的, 提取时视为 1 个了。

4 总 结

利用数字全息技术, 可通过一次拍摄获得整个三维场的立体分布图及不同截面的二维分布图, 大大提高了工作效率, 还可得到透明粒子的三维图像, 给粒子识别提供了巨大的方便。实验中影响成像质量的除 CCD 的低分辨率外, 还有平行光束的非均匀性。严格的强度均匀的平行光很难获得, 而用不均匀的平行光得到的全息图在进行直接透射光的滤波后会影响到再现像的质量。该技术的另一个局限在于 CCD 靶面尺寸很有限, 将影响场的大小和再现像的清晰程度。因此, 针对具体的气泡场, 还需进一步完善实验的记录系统和实验用的仪器。

参 考 文 献

- 1 R. A. Brown. Surface Fluxes and Remote Sensing of Air-Sea Interactions, in Surface Waves and Fluxes, Volume I-Current Theory [M]. Cambridge: Kluwer Academic Publishers, 1990. 7~28
- 2 H. Medwin. Counting bubbles acoustically[J]. *Rev. Ultrason.*, 1977, **15**(5): 7~13
- 3 G. B. Deane, M. D. Stokes. Air entrainment processes and bubble size distributions in the surf zone[J]. *J. Phys. Ocean*, 1999, **29**(7): 1393~1401
- 4 W. Timothy Liu, Kristina B. Katsaros, Joost A. Businger. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the surfaces[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**(9): 1722~1735
- 5 I. Leifer, G. De Leeuw. Bubble plume distributions from breaking wind steepened waves in Preparation[J]. *J. Marine Systems*, 2007, **66**(14): 1211~1218
- 6 I. Leifer, G. De Leeuw, L. H. Cohen. Optical measurement of bubbles system design and application[J]. *J. Atmos. Ocean Technol.*, 2003, **20**(9): 1317~1332
- 7 K. Tsuchiya, H. Mikasa, T. Saito. Absorption dynamics of CO₂ bubbles in a pressurized liquid flowing downward and its simulation in seawater chem[J]. *Eng. Sci.*, 1983, **52**(21): 4119~4126
- 8 Zhang Ting, Jiang Wang, He Yanlan *et al.*. Underwater holographic experiment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*. 2002, **39**(11): 12~14
张 婷, 蒋 望, 何焰兰 等. 水下全息实验[J]. *激光与光电子学进展*, 2002, **39**(11): 12~14
- 9 Cao Ruixue. Survey and analysis of surface and sub-surface bubbles in ocean[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006. 65~68
曹瑞雪. 海洋表层及次表层气泡测量和分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006. 65~68
- 10 Wang Xinlou. Analysis of wavelet denoising methods and Matlab emulation[J]. *Ind. Control Comput.*, 2008, **21**(6): 2
王新楼. 小波去噪方法分析与Matlab仿真[J]. *工业控制计算机*, 2008, **21**(6): 2
- 11 He Xiangdong, Xiang Shifa, Wang Peng *et al.*. Study on auto-analysis of particle field hologram[J]. *J. Dalian University Technol.*, 1988, **27**(2): 23~28
何向东, 项世法, 王 朋 等. 微粒场全息图自动分析技术的研究[J]. *大连工学院学报*, 1988, **27**(2): 23~28
- 12 E. Malkiel, O. Alquaddoomi, J. Katz. Measurements plankton distribution in the ocean using submersible holography[J]. *Meas. Sic. Technol.*, 1999, **10**(12): 1142~1152
- 13 Bengt Nilsson, Torgny E. Carlsson. Direct three-dimensional shape measurement by digital light-in-flight holography[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(34): 7954~7959
- 14 Lü Qieni. Study of digital holography and its application in partial field[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. 108~110
吕且妮. 数字全息技术及其在粒子场中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2003. 108~110