

文章编号:1004-4213(2010)03-0533-4

多光束数字全息的研究*

张雯,周皓,顾济华[†],杨俊义,姜锦虎,高本利

(苏州大学 a. 教育部现代光学技术重点实验室; b. 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

摘要:提出了一种多光束数字全息技术来解决当利用菲涅耳数字全息对全息图进行再现时,物体的多个表面无法同时再现得明亮、清晰. 该方法是记录时采用多光束照明同一物体的多个表面,增强 CCD 上接收到的物体侧面散射光的强度. 实验成功地同时再现了物体的多个表面. 同时,为了减弱再现像的散斑噪声,采用双线性插值和中值滤波处理图像,获得了质量高的三维物体的再现图像.

关键词:信息光学;数字全息;菲涅耳衍射;多光束数字全息

中图分类号: O438.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103903.0533

0 引言

目前,数字全息的研究工作包涵了对再现像分辨率的研究^[1]、数字全息成像系统的景深和焦深的研究^[2]、数字水印^[3-4]、三维再现与识别^[5-7]等等一系列领域. 采用单光束照明三维不透明物体时,菲涅耳数字全息的再现不能明亮清晰地再现物体的侧面. 本文提出了多光束数字全息技术,结合数字全息的基本理论,分别利用单光束和多光束照明三维物体,进行菲涅耳数字全息实验研究. 实验中用 CCD 采集三维物体的全息图,再现三维物体的形貌特征,对用这两种方法得到的实验结果进行比较,并采用双线性插值和中值滤波的方法减弱图像的散斑噪声,得到了质量更优的三维物体的再现图像.

1 数字全息记录与再现原理

图 1 为数字全息的记录和再现原理图, x_0y_0 平面是物平面, xy 平面是全息图平面,也就是 CCD 放

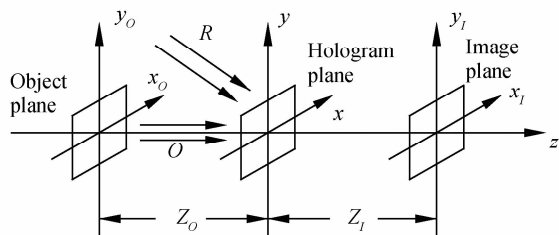


图 1 数字全息的记录和再现原理

Fig. 1 The theory of the recording and reconstruction of digital holography

置的位置, x_1y_1 平面是再现像平面. 全息记录平面和再现像平面到全息图平面的距离分别为 Z_0 和 Z_1 . Z_0 就是物体至 CCD 的距离.

设物光波的复振幅分布 $O(x_0, y_0)$, 在菲涅耳近似下, 全息记录平面上的光场分布 $O(x, y)$ 可以写成

$$O(x, y) = \frac{\exp(ikZ_0)}{ikZ_0} \exp\left[i\frac{k}{2Z_0}(x^2 + y^2)\right] \times \iint_{-\infty}^{\infty} O(x_0, y_0) \exp\left[i\frac{k}{2Z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right] \times \exp\left[-i\frac{k}{Z_0}(xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0 \quad (1)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, 全息记录平面上的光场分布 $O(x, y)$ 就是物光波复振幅分布 $O(x_0, y_0)$ 的菲涅耳衍射积分. 则被记录物体的再现像可以由菲涅耳积分公式得出

$$U_I(x_1, y_1) = \frac{i}{\lambda Z_1} \exp\left[i\frac{k}{2Z_1}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[-i\frac{k}{Z_1}(xx_1 + yy_1)\right] dx dy \quad (2)$$

$I(x, y)$ 是全息图的光强, $R(x, y)$ 是全息图平面上参考光的复振幅分布. 由于数字全息图的记录介质是 CCD, 需要将式(2)改写成离散形式

$$U_I(m, n) = \exp\left[-i\frac{k}{2Z_1}(m^2 \Delta x_1^2 + n^2 \Delta y_1^2)\right] \times \sum_{K=0}^{M-1} \sum_{L=0}^{N-1} R(K, L) I(K, L) \times \exp\left[-i\frac{k}{2Z_1} \cdot (K^2 \Delta x^2 + L^2 \Delta y^2)\right] \times \exp\left[-i k \lambda \cdot (Km/M + Ln/N)\right] \quad (3)$$

M, N 分别为二维抽样点数, $\Delta x, \Delta y$ 和 $\Delta x_1, \Delta y_1$ 分别为全息图平面和再现像平面上的采样间隔.

* 国家自然科学基金(10774109)资助

Tel: 0512-69157125

Email: jhgu@suda.edu.cn

收稿日期: 2009-03-10

修回日期: 2009-08-03

2 实验

以往文献报道的非涅耳数字全息一般都采用单光束照明物体^[8-10],本实验过程中,分别采用单光束照明物体和多光束照明物体两种方法,对采集到的非涅耳数字全息图进行再现与比较,证明了采用多光束照明物体的方法可获得质量更高的三维物体的再现图像。

2.1 利用单光束照明物体

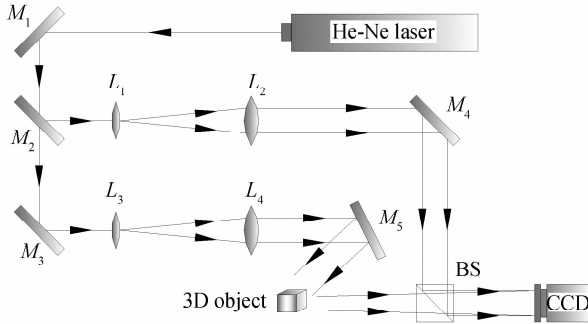


图2 单光束照明实验光路图

Fig. 2 Experimental configuration of single-beam illumination

用单光束照明物体的实验光路图如图2, M_1 、 M_3 、 M_4 、 M_5 为全反镜, M_2 为分束镜, L_1 、 L_3 为扩束透镜, L_2 、 L_4 为准直透镜, BS 是分光棱镜. He-Ne 激光经过 M_1 后被 M_2 分为两束光: 一束光准直之后经 M_5 反射照射在三维物体上, 再由物体反射后经过 BS 照射到 CCD 靶面上; 另一束光直接由 M_4 和 BS 反射后也照射到 CCD 靶面上, 形成菲涅耳全息记录光路。

将 CCD 采集到物体的菲涅耳全息图读入计算机, 利用菲涅耳衍射公式的离散形式(3)并采用快速傅里叶变换提高运算速度, 得到物体的再现像。

图3分别是单光束照明实验光路采集到的骰子的全息图及其数字再现像。

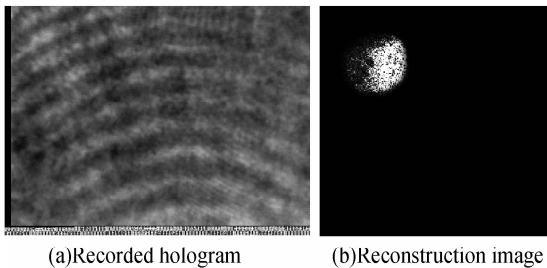


图3 单光束照明实验记录到的全息图及数字再现像

Fig. 3 The hologram recorded and the reconstruction image of the hologram during the experiment of single-beam illumination

2.2 利用单光束照明物体的不足之处

在利用单光束照明物体时, 如实验中采用的骰子, 由骰子的“三”和“六”两个侧面散射到 CCD 靶面的光很弱, 因此, 这两个侧面的再现像很暗,

甚至无法清楚辨认. 为了能清晰明亮地再现物体的侧面, 在传统的光学全息中, 通常采用尺寸较大的全息干板. 在大尺寸的全息干板的中心位置, 接收到的物体侧表面的散射光很弱, 然而, 在干板的某些地方能够接收到较强的散射光. 再现的时候, 在这个地方就能观察到明亮的侧表面的再现像. 但是, 用这种方法也不能同时再现骰子的三个表面. 由于干板记录物体时, 每个地方记录的物体每一面的光强不一样, 通过干板再现时, 必须在某个特定的角度才能观察到骰子清晰的某一面, 而不能在一个角度同时观察到骰子的三个侧面。

一般情况下, 单光束只能同时照在骰子的两个表面, 如该光路(图2)中的单光束照射在骰子“三”和“五”两面, 因此只能得到两个面的再现像; 同理如果实验中的单光束是照射在骰子“三”和“六”两面上, 就能得到骰子的“三”和“六”两面的再现像。

为了解决一般情况下单光束照明不能同时再现骰子三个侧表面的问题, 本文提出了多光束数字全息技术. 用另外的光束照明物体的侧面, 使骰子的三个侧面光照均匀. 这样, 在 CCD 上接收到的物体侧表面的散射光就会强一些, 因此, 侧表面的再现像的亮度也会强一些。

2.3 利用多光束照明物体

图4就是利用多光束照明物体的实验光路图, 与图2相比, 增加了一个全反镜 M_6 . M_6 反射的光照射在物体上是为了增强 CCD 接收到的物体侧面散射光的强度. 平行光束经全反镜 M_5 反射后照射到骰子的“三”和“五”两个表面; 经过骰子的光由全反镜 M_6 反射后照射在骰子的“三”和“六”两个表面, 骰子的三个表面均被照明. 光束照射在骰子上的实际位置如图4中小图。

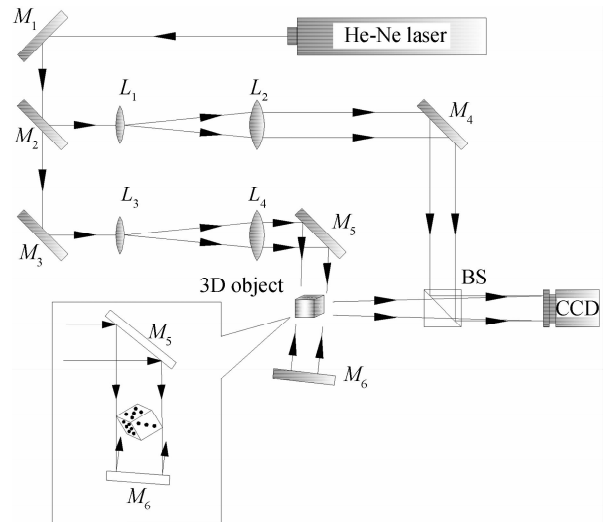


图4 多光束照明实验光路图

Fig. 4 Experimental configuration of multi-beam illumination

图 5 是多光束照明实验光路采集到的骰子的全息图及其数字再现像。

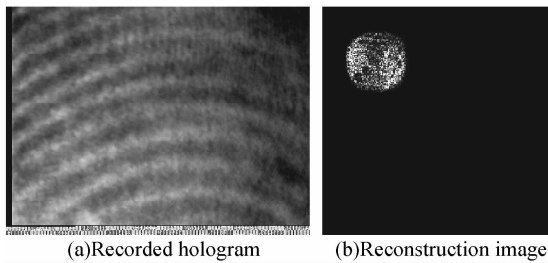


图 5 多光束照明实验记录到的全息图及数字再现像
Fig. 5 The hologram recorded and the reconstruction image of the hologram during the experiment of multi-beam illumination

2.4 减弱散斑噪声

由图 4(b)和图 5(b)可以看出,再现像的散斑噪声比较大,使得再现图像不清晰.为了得到更好的再现像像质,采用双线性插值的方法将图像缩小,消除图像的高频分量^[11],再对图像进行中值滤波来处理结果.图 6 分别为将上述两种方式得到的再现像经过处理后的结果.从图上可以看出,图 6(b)骰子上三个侧面的点清晰可见,效果较图 5(b)有明显改善.

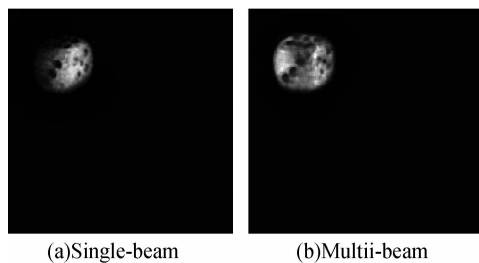


图 6 经处理后的实验结果
Fig. 6 The improved image

图 6(a)是用单光束照明三维物体得到的实验结果,图 6(b)是利用多光束照明得到的结果.比较两幅图,可以看出三维物体的立体效果得到了明显的增强.(a)图中,只能清楚的再现骰子的一面,另外两个侧表面不能清晰再现.而(b)图中,骰子的“三”、“五”、“六”点都清晰可见.由此可说明,利用多光束照明三维物体获得的三维物体的再现图像质量更高.

3 结论

采用单光束照明物体进行菲涅耳数字全息再现时,常常无法清晰再现三维不透明物体的侧表面.本文提出的多光束数字全息技术,能够成功地同时再

现三维物体的多个表面.为了减弱再现像的散斑噪声,采用了双线性插值和中值滤波的方法,提高了再现像的质量.本文的方法对于数字全息干涉计量中实时研究三维物体的不同表面形貌特征具有很好的应用价值.

参考文献

- [1] WANG Hua-ying, WANG Guang-jun, ZHAO Jie, *et al.* Resolution analysis of imaging system with pre-magnification digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 729-733.
王华英,王广俊,赵洁,等.预防大数字全息系统的成像分辨率分析[J].光子学报,2008,**37**(4):729-733.
- [2] WANG Hua-ying, SONG Xiu-fa, ZHAO Jie, *et al.* Analysis of depth of view and focus of digital holographic imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 7040-1141.
王华英,宋修法,赵洁,等.数字全息成像系统的景深和焦深分析[J].光子学报,2008,**38**(7):7040-1141.
- [3] LIU Wei, GU Ji-hua, YU-CHI Liang, *et al.* A blind audio watermark algorithm by a holographic technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 9870-2971.
刘薇,顾济华,尉迟亮,等.一种基于数字全息技术的盲水印算法[J].光子学报,2006,**35**(11):9870-2971.
- [4] CHEN Lin-sen, ZHOU Xiao-hong, SHAO Jie. A digital hologram watermarking with large information contents based on binary phase encryption method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 715-026.
陈林森,周小红,邵杰.一种基于二元位相加密的大信息量数字全息水印[J].光子学报,2005,**34**(4):715-026.
- [5] MA Li-hong, WANG Hui, LI Yong, *et al.* 3-D rebuilding based on numerical reconstruction of the hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 595-598.
马利红,王辉,李勇,等.全息模拟再现像的三维重构[J].光子学报,2006,**35**(4):595-598.
- [6] JAVIDI B, TAJAHUERCE E. Three-dimensional object recognition by use of digital holography[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(9): 610-612.
- [7] FRAUEL Y, JAVIDI B. Neural network for three-dimensional object recognition based on digital holography[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(19): 1478-1480.
- [8] TAJAHUERCE E, MATOBA O, JAVIDI B. Shift-invariant three-dimensional object recognition by means of digital holography[J]. *Appl Opt*, 2001, **40**(23): 3877-3886.
- [9] FRAUEL Y, TAJAHUERCE E, CASTRO M A, *et al.* Distortion-tolerant three-dimensional object recognition with digital holography[J]. *Appl Opt*, 2001, **40**(23): 3887-3893.
- [10] FRAUEL Y, TAJAHUERCE E, MATOBA O, *et al.* Comparison of passive ranging integral imaging and active imaging digital holography for three-dimensional object recognition[J]. *Appl Opt*, 2004, **43**(2): 452-462.
- [11] WANG Jia-wen, LI Yi-jun. Processing of graphics and image by use of MATLAB 7.0[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 160-161.
王家文,李仰军. MATLAB 7.0 图形图像处理[M].北京:国防工业出版社,2006:160-161.

Multi-beam Digital Holography

ZHANG Wen, ZHOU Hao, GU Ji-hua, YANG Jun-yi, JIANG Jin-hu, GAO Ben-li
(a. Key Laboratory of Modern Optical Technology; b. Physics Department, Soochow University,
Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract: The technology of multi-beam digital hologram is proposed to the problem that due to the influence of the illumination, CCD only can receive a little weak scattered wave from the lateral surface of the object, so that it can not reconstruct the multi-surface of the object clearly and brightly at the same time. The proposed method points out that it can use multi-beam to illuminate several surfaces of three-dimensional object. It enhances the intensity of the scattered wave received by CCD from the lateral surface of the object. Multi-surface of three-dimensional object is reconstructed successfully in this experiment. Then, in order to reduce speckle noise of the reconstruction image, is bilinear interpolation and median filter is adopted to process the image, and high quality reconstruction image of three-dimensional object is acquired.

Key words: Information optics; Digital holography; Fresnel diffraction; Multi-beam digital holography



ZHANG Wen was born in 1984. She is a M. S. degree candidate, and her research interests focus on reconstructing the morphology of three-dimensional object and the microscopy by digital holography.



GU Ji-hua was born in 1957. He obtained Ph. D. degree from Ruhr-University of Bochum, Germany, 1993. Now he works as a professor, and his research interests focus on optical measurement and information processing.