

全息模拟再现像的三维重构*

马利红 王 辉 李 勇 金洪震

(浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

摘 要 提出一种全息模拟再现像的三维重构方法, 可以模拟再现得到三维再现像. 计算机模拟再现许多幅在不同深度位置的二维光强分布; 利用灰度级变化的聚焦度评价方法, 通过寻找最大聚焦度值, 确定再现三维像各像点的深度信息. 实验证明, 该方法能实现模拟再现像的三维重构, 使数字全息术有希望成为一种全新的三维面形检测技术. 再现像三维重构的实现可以更客观地对全息图进行像质评价, 并验证计算机全息术算法的正确性.

关键词 数字全息; 立体重构; 最大聚焦度; 模拟再现

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

0 引言

数字全息术的研究工作涵盖了面形测量^[1]、变形测量^[2]、振动测量^[3]等一系列领域. 数字模拟再现是数字全息术研究中的一个热点问题. 很多学者对全息图的模拟再现作了研究^[4~7]. 但是这些研究都还仅限于模拟再现得到二维光分布. 二维光分布并不能很好地反映三维再现像的信息, 当然也不能获取三维面形数据. 本文提出了一种全息模拟再现像的三维重构方法. 首先, 计算机模拟再现许多幅不同深度位置的二维光强分布; 然后, 利用灰度级变化的聚焦度评价方法^[8], 通过寻找各小区域的最大聚焦度值, 确定再现三维像的各个小区域的深度信息, 从而实现了再现像的三维重构. 通过再现像的三维重构, 可以获得原物体的三维面形数据, 使数字全息术有希望成为一种全新的三维面形检测技术. 另外, 再现像的三维重构的实现可以更客观地对全息图进行像质评价, 以及验证计算机全息术算法的正确性.

1 全息图模拟再现原理

全息记录是利用干涉原理, 将物体发出的特定光波以干涉条纹的形式记录下来, 使物光波前的全部信息都贮存下来. 以 $R(x, y)$ 表示参考光, $O(x, y)$ 表示物光, 则记录的总光强为

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 \quad (1)$$

利用全息衍射再现的原理, 用计算机模拟再现数字全息图. 数字计算产生照明波前 $C(x, y)$. 由衍射原理可知, 全息图平面的透射波场 $U(x, y)$ 为照明波前与衍射屏(全息图)振幅透射率的乘积^[9], 即

$$U(x, y) = C(x, y)I(x, y) = C|R|^2 + C|O|^2 + CR^*O + CRO^* \quad (2)$$

透射波前 $U(x, y)$ 中的第四项包含了原物光的共轭信息, 如果再现光 $C(x, y) = R^*(x, y)$, 可以再现得到与原物体一致的实像. 在 $O^*(x, y)$ 传播的光场区域, 选取一系列与全息图平行的平面, 并计算其二维光场分布. 通过研究各个平面光强分布的规律找出三维像点的位置和亮度数据. 设某一选择平面 P_{η} , 离全息图的距离为 d , 在非涅耳近似情况下, 再现共轭物光波前 $U_{\omega}(\xi, \eta)$ 的计算表达式如式(3)

$$U_{\omega}(\xi, \eta) = A \int\!\!\int O^*(x, y) \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)\right] \cdot \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right\} \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)\right\} dx dy = A \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)\right\} \int\!\!\int O^*(x, y) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right\} \cdot \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)\right] dx dy \quad (3)$$

$O^*(x, y)$ 可以表示成会聚于不同点 (ζ_i, η_i, d_i) 处球面波的叠加, 会聚点即为像点. 即在数学上 $O^*(x, y)$ 可以表示成

$$O^*(x, y) = \sum_i B_i \exp\left\{-i\frac{\pi}{\lambda d_i}(x^2 + y^2)\right\} \cdot \exp\left\{-i\frac{\pi}{\lambda d_i}(\xi_i^2 + \eta_i^2)\right\} \exp\left\{i\frac{2\pi}{\lambda d_i}(x\xi_i + y\eta_i)\right\} \quad (4)$$

式中 B_i 表示会聚于 (ζ_i, η_i, d_i) 处的像点的亮度. 于是式(3)可表示为

$$U_{\omega}(\xi, \eta) = A \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)\right\} \int\!\!\int \sum_i B_i \cdot \exp\left\{-i\frac{\pi}{\lambda d_i}(\xi_i^2 + \eta_i^2)\right\} \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda d_i}(x^2 + y^2)\right\} \cdot \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right\} \exp\left\{i\frac{2\pi}{\lambda d_i}(x\xi_i + y\eta_i)\right\} \cdot \exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)\right\} dx dy \quad (5)$$

因为光强分布为 $|U_{\omega}(\xi, \eta)|^2$, 显然, 对于 $d_i = d$ 的

*国家自然科学基金(60477039)、浙江省自然科学基金(102056)和浙江省科技计划(2003C31011)资助项目
Tel: 0579-2298833 Email: lihong-ma@tom.com
收稿日期: 2005-01-27

会聚点,积分结果为 δ 函数,即为像点. 而 d_i 不等于 d 的会聚点,在选择平面上则形成弥散斑.

2 再现像三维重构算法

由分析可知,全息图在一定条件下再现,可以得到原物体的三维再现实像. 但是由式(5)计算得到的是一个与全息图平面有着确定距离的二维平面上的光分布,这个分布是聚焦像和离焦像的混合分布. 从图 1 可以看到位于选择平面上的像点形成的是清晰的、聚焦度很好的像点;不在选择平面上的像点弥散成一个光斑. 所以,对于有足够对比度和细微结构的物体,像恰好位于选择平面时,有最大的灰度级变化;离焦像的灰度则因模糊而平均化,像点离选择平面越远,灰度级变化越小. 本算法就是在大量的再现二维光强分布中,寻找出具有最大灰度级变化的选择平面,从而确定再现三维像像点的深度信息.

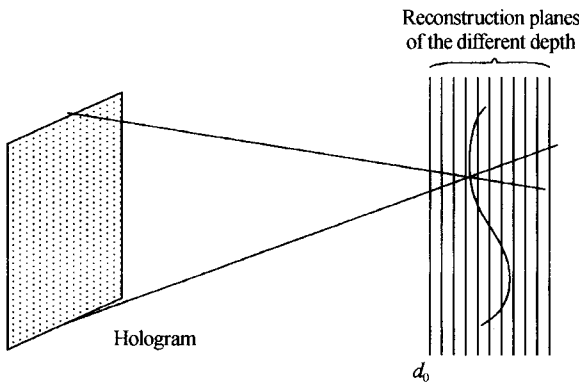


图 1 2D 再现光分布平面的位置
Fig. 1 2D reconstruction light field distribution place sketch map of the different depth

如图 1,模拟再现大量(假设共有 L 幅)的不同深度位置的二维光强分布,但相邻两幅之间的深度间隔相等. 对于二维光强分布平面上的所有点而言,可以采用矩阵形式来加以讨论. 再现 L 幅二维光强分布,每幅二维光强分布的大小为 M 行、 N 列,即有 L 个 $M \times N$ 的光强分布矩阵,如图 2.

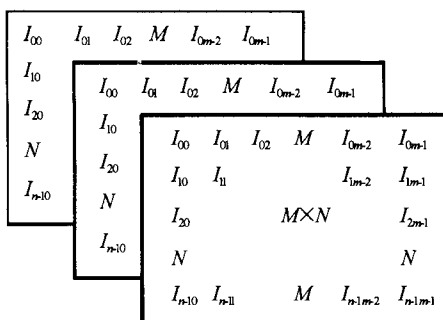


图 2 $M \times N$ 的光强分布矩阵
Fig. 2 $M \times N$ matrix of the 2D reconstruction light field intensity distribution

当模拟再现二维光强分布时,各相邻二维光强分布平面的深度间距相等,均为 Δz ,以 d_0 选择平面为基准,各个二维分布平面的深度可表示为

$$z_k = d_0 + k\Delta z \quad (k=0, 1, 2, \dots, L-1) \quad (6)$$

如果将模拟再现的三维像看作是由许多个极小区域组成的(这里所说的极小区域,指每个小区域的面积相对于再现像和全息图之间的距离,要小得多),则认为每个小区域具有近似相同的深度信息. 所以可以将模拟再现的二维光强分布面分成许多个小区域,称作样本区域. 假设样本区域取样点数为 $m \times n$,则每个选择平面上具有的样本序列为

$$m' = 1, 2, 3, \dots, M \quad (M = \frac{M}{m})$$

$$n' = 1, 2, 3, \dots, N' \quad (N' = \frac{N}{n})$$

在选择平面 z_k 上,第 (m', n') 个样本区域内聚焦度为

$$\gamma_{(m'n')z_k} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I_{(m'n')z_k}(i, j) - \bar{I}_{(m'n')z_k}]^2 \quad (7)$$

式中, $I_{(m'n')z_k}(i, j)$ 选择平面 z_k 上,第 (m', n') 个样本区域内各点的光强, $\bar{I}_{(m'n')z_k}$ 为小区域内光强分布平均值. 不同的选择平面,第 (m', n') 个样本区域一一对应,可以得到 L 个第 (m', n') 样本区域内的聚焦度

$$\gamma_{(m'n')z_1}; \gamma_{(m'n')z_2}; \gamma_{(m'n')z_3}; \dots; \gamma_{(m'n')z_L} \quad (8)$$

对这 L 个聚焦度值进行比较,找出最大的聚焦度值,并记录下其所处的再现光强分布面的幅数 k ,由式(6),计算得到该样本区域像的深度为

$$z_k = d_0 + k\Delta z$$

通过对 L 个聚焦度矩阵中的所有 (m', n') 样本的对应聚焦度值进行比较寻找最大聚焦度值的运算,即可确定像的每个样本区域的深度信息. 至于平面坐标 x, y ,可以通过记录样本区域序数获得. 这样,就得到了三维值阵 $(x_{m'}, y_{n'}, z_{m'n'})$,实现了三维像的立体重构.

3 计算机模拟验证

用计算机全息的方法获得数字全息图^[10]. 记录的物体是一个三维人头模型,其三维数据是由四川大学开发的三维扫描仪扫描获得;数据处理后,物体的横向大小为 $2 \text{ cm} \times 1.6 \text{ cm}$,深度为 1.6 cm . 图 3(a)为三维人头模型的平面照片. 计算机全息图的抽样间隔为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$,总像素为 4096×4096 ,物体离全息图的最近距离为 20 cm . 图 3(b)为计算机全息图的片段. 图 3(c)为全息图的光学再现像. 利用快速傅里叶变换的算法,做式(3)的积分,得到再现实像的二维光场分布. 模拟再现了 90 幅二维光强分布,相邻光强分布平面深度间隔 0.2 mm . 计算聚焦度时,为了减少计算量,只选取实像所在的

区域进行计算,像素总数为 $M=1800, N=1800$. 样本区域的像素点数为 6×6 , 所以样本区域数为: $M=300, N=300$. 为了减少数据量,使呈现的图像更

清晰,作图时从 300×300 的像素中抽取了 60×60 的像素. 图 3(d)给出了三维重构的实验结果.

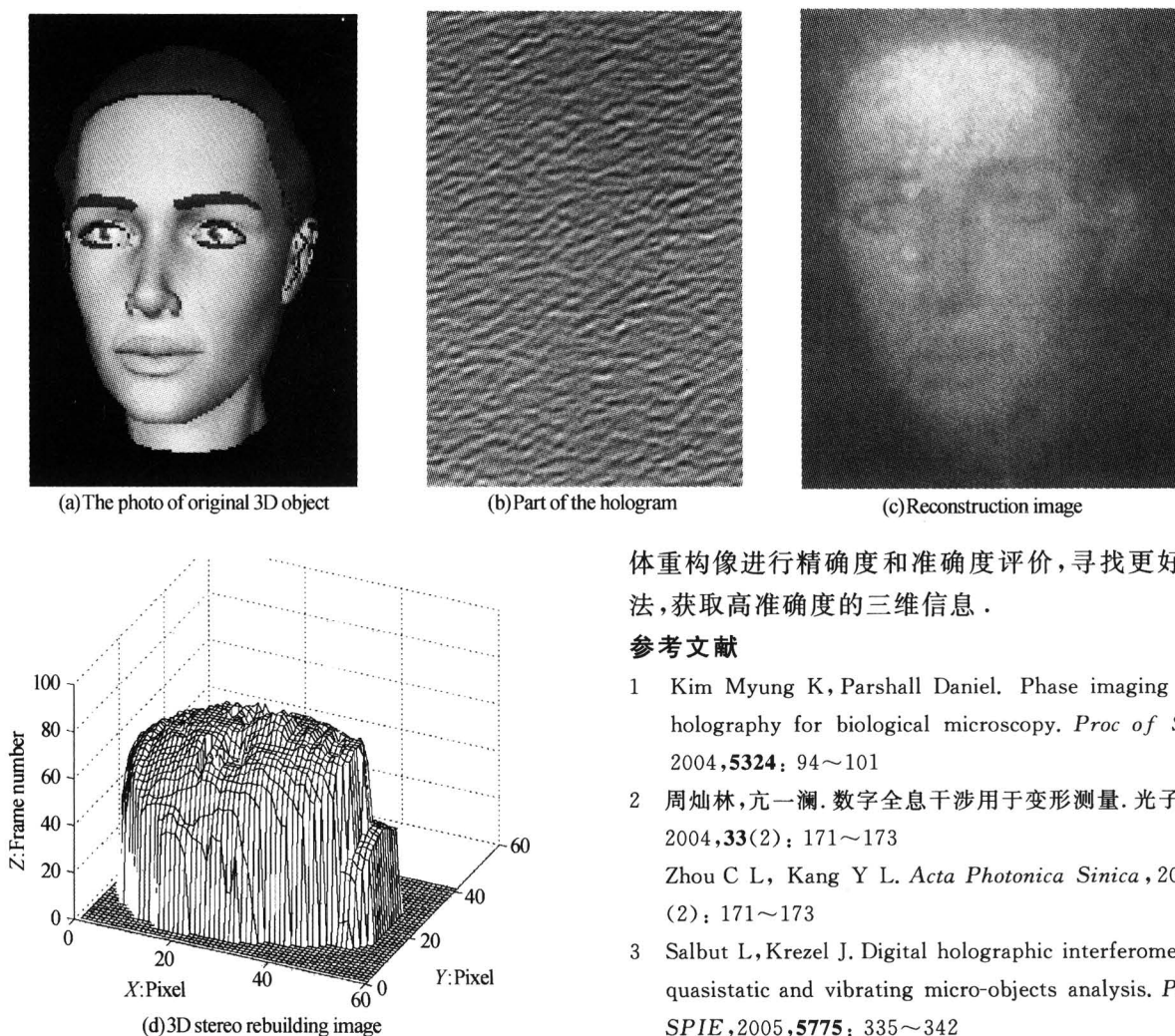


图 3 实验结果
Fig. 3 Experimental result

这里有几个值得注意的问题. 第一个是计算聚焦度时,样本区域像素点数的选择问题. 像素点数选择太少,聚焦度会对噪音和像重叠更为敏感,从而导致错误的深度估计. 对于那些低对比度的物体尤其需要较多的像数点数. 最优的像数点数要通过反复的实验获得. 第二个问题是再现光强分布的幅数选择问题. 再现幅数越多,得到的深度值越精细,但计算越费时. 另外,由于采用的是聚焦度灰度级评价方法,所以此方法特别适用于有纹理对比度的物体.

4 结论

实验证实了该方法可以实现全息模拟再现像的三维重构. 此方法可以更客观地对全息图进行像质评价,以及验证计算机全息术算法的正确性,也是物体三维形貌立体重构的一种全新的尝试. 但是,目前所做的工作还相当粗略. 今后,将进一步对立

体重构像进行精确度和准确度评价,寻找更好的算法,获取高准确度的三维信息.

参考文献

- Kim Myung K, Parshall Daniel. Phase imaging digital holography for biological microscopy. *Proc of SPIE*, 2004, **5324**: 94~101
- 周灿林, 亢一澜. 数字全息干涉用于变形测量. *光子学报*, 2004, **33**(2): 171~173
Zhou C L, Kang Y L. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 171~173
- Salbut L, Krezel J. Digital holographic interferometer for quasistatic and vibrating micro-objects analysis. *Proc of SPIE*, 2005, **5775**: 335~342
- 孙萍, 谢敬辉, 蒋玉蓉, 等. 光学扫描全息术中的孪生像噪音及消除. *光子学报*, 2003, **32**(3): 340~343
Sun P, Xie J H, Jiang Y R, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 340~343
- 刘诚, 刘志刚, 程笑天, 等. 数字滤波法再现电子全息图. *光学学报*, 2003, **23**(2): 150~154
Liu C, Liu Z G, Cheng X T, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 150~154
- 刘诚, 刘志刚, 薄峰, 等. 数字全息中再现像分离问题的研究. *光子学报*, 2003, **32**(5): 588~591
Liu C, Liu Z G, Bo F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 589~591
- Lebrun D, Benkouider A M, Coetmellec S, et al. Particle field digital holographic reconstruction in arbitrary tiled planes. *Optics Express*, 2003, **11**(3): 224~229
- Jarvis R A. Focus optimization criteria for computer image processing. *Microscope*, 1976, **24**(2): 163~180
- 苏显渝, 李继海. *信息光学*. 北京: 科学出版社, 2002. 114
Su X Y, Li J T. *Information optics*. Beijing: Science Press, 2002. 114

10 王辉,李勇,金洪震,等. 三维面形测量数据的计算全息
可视化. 光学学报,2003,23(3):284~288

Wang H, Li Y, Jin H Z, et al. *Acta Optics Sinica*, 2003,
23(3):284~288

3-D Rebuilding Based on Numerical Reconstruction of the Hologram

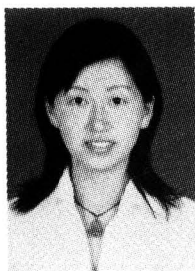
Ma Lihong, Wang Hui, Li Yong, Jin Hongzhen

Information Optical Institute, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004

Received date: 2005-01-27

Abstract Numerical reconstruction is the focus problem of the digital holography. However, the techniques that have been discussed can only obtain the 2-D light field distribution. In this article, a method about 3-D rebuilding based on numerical reconstruction of the hologram is proposed, by which the genuine 3-D image can be numerically reconstructed. A number of 2-D light field intensity distributions of the digital hologram are numerically reconstructed on the different depth planes. Then, the focus measure evaluation of the gray level variance is applied. By finding the maximum focus measure, decide on the depth information of each image point. The experiment confirms that the method can materialize the 3-D rebuilding of the reconstruction image, that is, 3-D profile information of the object can be obtained by the proposed approach. So digital holography can be a very promising technology for non-destruction 3-D shape measure. In addition, 3-D reconstruction can provide an effective way to the image evaluation of the hologram and validating the correctness of the CGH algorithm.

Keywords Digital holography; 3-D rebuilding; Maximum focus measure; Numerical hologram reconstruction



Ma Lihong was born in Jan. 1979, in Zhejiang Province. She received the B. S. degree from Department of Physics, Zhejiang Normal University in 2002 and now is pursuing her M. S. degree in Information Optical Institute, Zhejiang Normal University. Her main research interests are the information optics and holography.