

doi: 10.3788/gzxb20124105.0591

利用反射全息实现计算全息三维显示

拜晓慧, 万琳, 任亚萍, 黄艳芳, 王辉

(浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘 要: 计算全息和光学全息都可应用于三维显示, 但各有自己的优势和缺陷. 将计算全息和光学反射全息相结合, 可以突破光学全息对记录物体的限制, 进行虚拟物体或自然场景的全息图的制作, 同时可以实现白光再现. 本文首先用三维扫描仪获得实际物体的三维数据, 用“点云算法”模拟得到其菲涅耳全息图透射率数据, 采用计算全息打印机将其输出于全息记录介质, 得到可光学再现的菲涅耳计算全息图 H_1 . 然后将 H_1 作为光学全息的记录物体进行反射全息记录, 将平面全息转化为体全息, 实现了计算全息白光再现.

关键词: 计算全息; 菲涅耳全息图; 三维显示; 反射全息

中图分类号: O438.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)05-0591-5

0 引言

众所周知, 光学全息是最有前途的三维显示技术^[1-2], 但光学全息图是由光的干涉形成的, 一般需要相干光, 这样就限制了需要显示的物体. 一方面动态物体和大的物体很难作为光学全息的记录目标, 例如动物、大楼等; 而一些自然场景和自发光的物体根本无法进行全息的拍摄, 例如云彩、火焰等; 进一步, 对于计算机设计的虚拟物体也无法进行光学全息记录. 将计算全息用于三维显示, 已经成为当前研究的热点^[3-4], 计算全息可以综合复杂的, 或者实际不存在的物体, 具有独特的优点和极大的灵活性, 但计算机全息只能做平面全息, 不能做反射体积全息, 因而计算全息再现时, 要受到再现光源限制. 反射体积全息^[5-6]可以在白昼自然环境中或者在一般白光照明下观察到三维图像, 观察视角大, 其衍射效率可以达到 100%. 本文提出将计算全息和光学反射全息相结合, 首先运用计算全息制作菲涅耳全息图, 将其再现像作为光学全息的记录目标记录反射全息, 从而实现计算全息像的白光再现.

1 计算全息图 H_1 的制作

菲涅耳型全息图记录的是物光波在一定距离 z 处的菲涅耳衍射分布的复振幅. 首先必须求出物体发出的波前在某一特定距离平面上的菲涅耳衍射图

的数学表达式, 然后用计算机编码成全息图的透过率变化, 通过计算全息图缩微输出系统^[7], 制成菲涅耳计算全息图.

在计算全息中的“物体”是数字化的三维图像, 数字化的三维物体既可以是 3D 软件设计虚拟物体, 也可以是通过三维扫描仪获得的实际物体三维数据. 可以用点云数据 (point cloud) 格式来描述物体各个点的三维坐标和亮度分布 (或彩色分布). 例如对于数据中第 i 个点, 数据格式为 $\{i, x_i, y_i, z_i, a_i, \varphi_i\}$, 其中, x_i, y_i, z_i 是第 i 点的空间坐标, a_i 是与其亮度对应的振幅, φ_i 是一个相位, 对于漫射物体, φ_i 是随机的. 计算全息时, 将每个数据点作为一个点光源, 模拟其球面波传播. 如果采用菲涅耳近似,

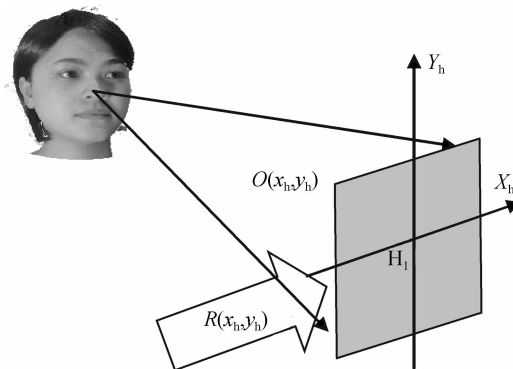


图 1 菲涅耳计算全息模拟光路
Fig. 1 The schematic for recording the Fresnel computer-generated hologram

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60877002)、浙江省自然科学基金 (No. Z1080030) 和浙江师范大学创新团队项目资助

第一作者: 拜晓慧 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为全息三维显示. Email: baixiaohui-119@163.com

导师 (通讯作者): 王辉 (1958-), 男, 教授, 主要研究方向为信息光学、全息技术、三维信息显示理论与技术、衍射光学. Email: wh@zjnu.cn

收稿日期: 2011-11-23; **修回日期:** 2012-01-01

则在计算全息平面 (X_h, Y_h) 上模拟光波的复振幅为

$$U_i(x_h, y_h) = \frac{\exp(jkz_i)}{\lambda z_i} a_i \exp(j\varphi_i) \cdot \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x_h - x_i)^2 + (y_h - y_i)^2]\right\} = \frac{a_i}{\lambda z_i} \exp[j\Phi_{oi}] \quad (1)$$

式中

$$\Phi_{oi} = kz_i + k \frac{(x_h - x_i)^2 + (y_h - y_i)^2}{2z_i} + \varphi_i \quad (2)$$

式(2)是第 i 个物点的模拟物光波在记录平面上的相位。 $k=2\pi/\lambda$, λ 是模拟光波波长。

仿照光学全息过程,设在记录面上同时存在模拟参考光,设参考光为平行光.复振幅为

$$R(x_h, y_h) = A_R \exp(jkx_h \sin\alpha)$$

则记录平面总的复振幅为

$$U_{hi}(x_h, y_h) = R(x_h, y_h) + U_i(x_h, y_h) \quad (3)$$

对上式计算模平方,得到仿真的全息图条纹分布为

$$I_{hi}(x_h, y_h) = |R(x_h, y_h) + U_{hi}(x_h, y_h)|^2 = |R(x_h, y_h)|^2 + |U_{hi}(x_h, y_h)|^2 + R^*(x_h, y_h) \cdot U_{hi}(x_h, y_h) + R(x_h, y_h)U_{hi}^*(x_h, y_h) = I_{hi0}(x_h, y_h) + R^*(x_h, y_h)U_{hi}(x_h, y_h) + R(x_h, y_h)U_{hi}^*(x_h, y_h) = I_{hi0}(x_h, y_h) + |R(x_h, y_h)| |U_{hi}(x_h, y_h)| \cos(\Phi_i) \quad (4)$$

式中

$$I_{hi0}(x_h, y_h) = |R(x_h, y_h)|^2 + |U_{hi}(x_h, y_h)|^2$$

$$\Phi_i = \Phi_{oi} - kx_h \sin\alpha$$

若物体有 M_0 个物点,则最后总的光强分布为

$$I_H(x_h, y_h) = \sum_i^{M_0} I_{hi}(x_h, y_h) = \sum_i^{M_0} I_{hi0}(x_h, y_h) + |R(x_h, y_h)| \sum_i^{M_0} |U_{hi}(x_h, y_h)| \cos(\Phi_i) \quad (5)$$

所谓计算全息就是计算式(5),具体计算时,可以令 $\sum_i^{M_0} I_{hi0}(x_h, y_h)$ 等于常量 I_{h0} ,这样既可以降低计算量,也可以减少全息图的带宽.式(5)的计算结果是二维数组,将数据分布变为灰度图图形格式,再经过全息打印机打印出来,这样就做好了菲涅耳计算全息图 H_1 .全息图的振幅透过率可以表示为

$$t(x_h, y_h) = \beta I(x_h, y_h) \quad (6)$$

β 为常量.

图2给出了计算全息实际计算流程.利用matlab计算平台,因此可以方便的利用数组进行计算.计算中全息平面抽样间隔的选取与物体的大小、全息图全息尺寸,计算波长和参物夹角有关.设物体最大尺寸为 X ,全息图最大尺寸为 L ,参物夹角为 α ,

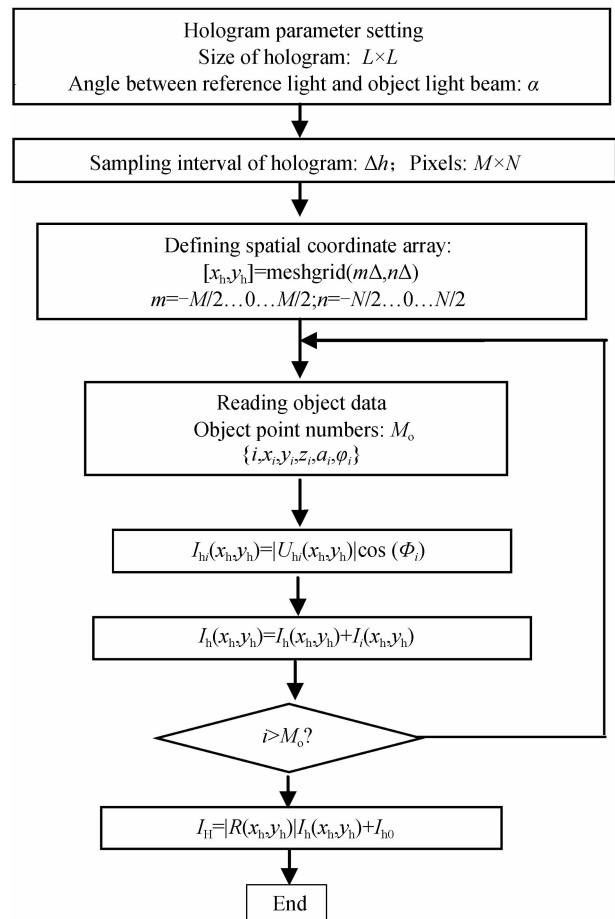


图2 菲涅耳计算全息计算流程图

Fig. 2 The flow chart for computing Fresnel hologram
计算波长为 λ ,则全息图上干涉条纹最大空间频率为^[8]

$$f_{\max} = \frac{L/2 + X/2}{\lambda z_{\min}} + \frac{\sin\alpha}{\lambda} \quad (7)$$

z_{\min} 是物点与计算全息图平面的最小距离.根据抽样定理,全息图抽样间隔必须满足

$$\Delta h \leq \frac{1}{2f_{\max}} \quad (8)$$

2 反射全息的拍摄

反射全息是物光和参考光从记录介质的两侧入射.由于参、物光波分别来自于介质的两侧,所以反射体积全息图的条纹面近似平行于介质的表面.再现时衍射波和照明波在全息图的同一侧,但方向相反,再现光波犹如在全息图上反射而成像.反射体积全息图具有很高的波长选择性,因此可以用白光照明再现出单色像.

如图3为反射全息的拍摄光路.图中BS为分束镜, M_1 和 M_2 为反射镜, L_1 和 L_2 为准直透镜, H_1 为计算机全息图.

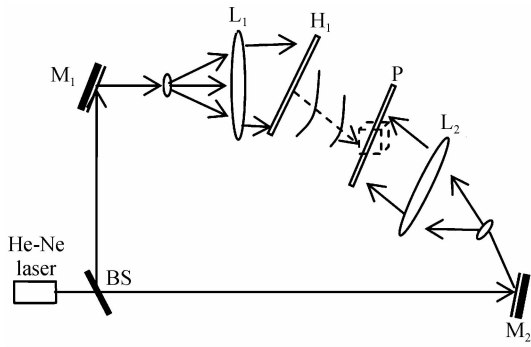


图3 利用计算全息图拍摄反射全息光路
Fig.3 The optical setup for recording reflection hologram using computer-generated hologram

实验步骤为:由激光器发出的相干单色光经过分束镜 BS 时被分成两束光,一束光经过扩束镜照射菲涅耳全息图 H_1 ,另一束经过 M_1 、 M_2 反射,扩束镜 L_2 扩束后,照射在反射全息干板 P 上,P 在 H_1 再现像的附近。

设照明 H_1 的光波全息平面上的复振幅分布为 $C(x_h, y_h)$,则透过全息图的光场为

$$U_c(x_h, y_h) = C(x_h, y_h)t(x_h, y_h) = \beta I_0 C(x_h, y_h) + \beta C(x_h, y_h)R^*(x_h, y_h)O(x_h, y_h) + \beta C(x_h, y_h) \cdot R(x_h, y_h)O^*(x_h, y_h) \quad (9)$$

式(9)三项分别是沿着不同方向的传播的光波,考虑第三项

$$U_{C_3}(x_h, y_h) = \beta C(x_h, y_h)R(x_h, y_h)O^*(x_h, y_h)$$

如再现光 $C(x_h, y_h)$ 设置为计算全息时的参考光共轭,即 $C(x_h, y_h) = R^*(x_h, y_h)$,则

$$U_{C_3}(x_h, y_h) = \beta |R(x_h, y_h)|^2 O^*(x_h, y_h) \quad (10)$$

如果参考光波是平行光,则 $U_{C_3}(x_h, y_h)$ 就是原物光的共轭光波,它的传播特征等价于原物光波的逆向传播,将在原物体的对称位置形成实像.将全息干板置于实像附近,并从干板的另一侧以一定的角度引入一束参考光波,这样可以记录其反射全息图 H_2 .

3 实验及结果

通过三维扫描仪获取真实人物头部(图 4(a)所示)的三维结构数据和黑白纹理数据,点云数 N 为 14 万个点.点云数据原空间最大坐标为: X 方向 (150 mm, -150 mm), Y 方向 (150 mm, -150 mm), Z 方向 (75 mm, -75 mm).在计算中,将物体缩小了 10 倍,即坐标范围为 X 方向 (15 mm, -15 mm), Y 方向 (15 mm, -15 mm), Z 方向 (7.5 mm, -7.5 mm).

参考光为平行光 $R(x, y) = A_R \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} x_h \sin \alpha)$, α 的大小设置一方面要保证再现的实像能够与原物光和直射光分离,也要满足全息打印机的对输出的全

息图分辨率的限制^[9].本文研制的计算全息图缩微直写打印机如图 5,输出的全息图分辨率可以达到 500 线对/mm.实验中,计算全息图相当于观察窗口,只有双眼能够同时看到再现像时才能产生立体视觉,因此计算全息图的大小为 70 mm×70 mm,因为 70 mm 刚好大于人眼的瞳距(约 65 mm).最小物距 $z_{min} = 300$ mm.由于全息打印输出系统的 500 线对/mm 分辨率的限制,根据式(7),计算全息参物夹角设为 10° .图 4(b)是最后输出的局部计算全息图.

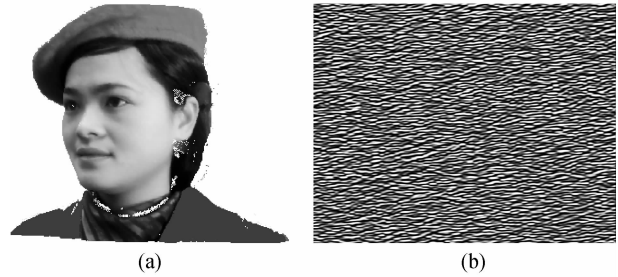


图4 (a)扫描获得的三维点云数字图像;(b)计算全息图(局部)

Fig.4 (a)3-D point cloud from scanner;(b)Computer-generated hologram



图5 计算全息图直写打印系统
Fig.5 The system of computer-generated hologram printer

利用银盐 HR-1 型全息干板记录全息图. HR-1 型全息干板的感光波长为 632.8 nm,分辨率大于 5 000线对/mm.图 6 是最后拍摄的反射全息图再现像,图 6(a)和(b)分别是不同视角拍摄的图像.虽然两个视图差异不大,但当用眼睛观察全息图时,具有很好的立体感觉.由于体全息的布喇格效应,再现像是红色单色像.研究表明,在不同的处理条件下,HR-1型全息干板乳胶剂具有收缩效应,可以得到



(a) Image with right eye (b) Image with left eye

图6 反射全息再现像
Fig.6 Reconstructed images of reflection hologram

不同的颜色再现,利用这一性质可以进行彩色反射全息的制作^[10].

计算全息除了灵活性、对制作条件要求简单之外,另一个优点是无相干噪音,这就保证了作为反射全息目标的再现像具有高的信噪比,最后再现像的噪音主要来自于反射全息拍摄时的相干噪音,和一般的光学全息拍摄一样,适当调整反射全息的参考光和物光的比例,相干噪音可以得到有效的抑制.

但作为立体显示技术,再现像的视角和视场是重要参量,视角和视场越大,可以达到的立体效果越好.而再现像的视角和视场取决于计算全息图的带宽积,带宽积越大,视角和视场越大.于计算全息而言,大的带宽积意味着大的数据量和大的计算量.本文实验的计算全息图空间带宽积为:计算全息面积 \times (计算全息图空间频率)² $=70^2 \times 500^2$.

在计算全息直写打印系统 500 线对/mm 限制下,只有通过增加计算全息的大小来增加带宽积.作为实验验证,本实验设置的全息图的大小刚好满足双眼观察三维图像的需要,实验观察表明,可以得到非常好的立体效果.

影响全息再现像质量的另一个因素是像模糊.造成本技术像模糊的主要原因是计算全息图输出的准确度.本文研制的计算全息图缩微直写打印机输出的全息图是由一系列单元全息图拼接而成,如果拼接准确度不高,将会造成其再现像点不重合而产生模糊.本实验所用的计算全息图缩微直写打印机拼接准确度达到 0.2 μm ,从实验结果来看,拼接引起的像模糊不明显.

4 结 论

由于光学反射全息受到相干条件的限制,使得所能记录的物体只能是静态的实际小物体.对于大的物体场景或者动态物体一般要利用脉冲激光记录,但存在辐射安全问题.而通过计算全息与光学全

息两步法得到的反射全息图,不仅可以实现自然白光全息再现,而且可以显示自然界存在或不存在的任何三维物体,增加了全息显示的灵活性和实用性,在三维艺术显示和文物展览中具有重要的应用价值.下一步的工作是研究彩色计算全息和光学全息结合进行彩色反射全息图拍摄,进一步增强全息三维显示的应用价值和拓展应用领域.

参 考 文 献

- [1] TAY S S, BLANCHE P A, VOORAKARANAM R, *et al.* An updatable holographic three-dimensional display [J]. *Nature*, 2008, **451**(7179): 694-698.
- [2] KIM Y S, KIM T, POON T C, *et al.* Three-dimensional display of a horizontal-parallax-only hologram [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(7): B81-B87.
- [3] PAN Y C, XU X W, SOLANKI S, *et al.* Fast CGH computation using S-LUT on GPU [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(21): 18543-18555.
- [4] KOKI W, MASAHIRO Y. Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(10): 9086-9101.
- [5] NAYDENOVA L, JALLAPURAM R, TOAL V, *et al.* A visual indication of environmental humidity using a color changing hologram recorded in a self-developing photopolymer [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(3): 031109(1-3).
- [6] YANG G G, CHEN H S, LEITH E N. Volume reflection holographic confocal imaging [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(23): 4076-4079.
- [7] JIN Hong-zhen, LI Yong, WANG Hui, *et al.* The design of auto-microcopy system for digital holograms [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(3): 233-236.
金洪震, 李勇, 王辉, 等. 数字全息图缩微输出系统设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(3): 233-236.
- [8] 陶纯堪, 陶纯匡. 光学信息论 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 109.
- [9] SHI Y L, WANG H, LI Y, *et al.* Practical method for color computer-generated rainbow holograms of real-existing [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(21): 4219-4226.
- [10] YE Hui, JIN Hong-zhen, WANG Hui, *et al.* The control of the emulsion contraction of silver halide plate and its application to color reflection hologram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 413-416.
叶慧, 金洪震, 王辉, 等. 银盐干板的皱缩控制及其在彩色反射全息上的应用 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 413-416.

Reflection Holography for Three-dimensional Display Based on Computer-generated Holography

BAI Xiao-hui, WAN Lin, REN Ya-ping, HUANG Yan-fang, WANG Hui

(*Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China*)

Abstract: Both of the computer-generated holograms and optical holograms can be applied to a three-dimensional display, but each has its own advantages and shortcomings. A novel technique is proposed based on the combination of computer-generated holography and reflection holography, which can overcome the limitation of optical holography. This technique can record real-existing objects and virtual objects, and achieve the reconstruction image by white light illumination. A 3D scanner is used to obtain 3D data of a real-existing object and calculate Fresnel holographic transmission distribution by point cloud algorithm. The Fresnel hologram is outputted by a holographic microfilming system. And, the reconstructed real image H_1 of the computing hologram is used as the recording object for optical reflection hologram. The principle of this technique is explained in detail and the experimental results demonstrate that the technique is feasible.

Key words: Computer-generated hologram; Fresnel hologram; Three-dimensional display; Reflection hologram