

复杂三维场景数字全息图消隐快速算法*

李 勇^{1,2} 苏显渝¹ 王 辉² 金洪震²

(1 四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

(2 浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

摘 要 提出了一种考虑人眼分辨率的快速消隐算法, 它按照人眼观察场景时的不同位置将全息图划分成相应的区域, 只对每个区域的中心点进行消隐, 再用消隐后的数据作为整个区域的场景数据制作数字全息图. 当区域尺寸小到一定程度时, 对于人眼来说, 中心消隐和逐点消隐的效果相当, 而消隐速度大大提高. 计算机模拟及实验表明, 该方法在不降低全息图再现像质的前提下, 将消隐速度提高了约 10^5 倍.

关键词 数字全息图; 三维显示; 消隐; 快速算法

中图分类号 TB877 **文献标识码** A

0 引言

激光全息是一种最有前途的逼真三维显示技术, 全息图的数字化工作一直是人们关注的议题. Schnars 等^[1] 提出用 CCD 元件作为全息图的记录材料得到数字全息图, 并用计算机获取物光波波前的方法, 但该方法对记录系统要求高, 而且仅仅是激光全息图的数字化, 不可避免的相干噪音对于三维显示来说不够理想. 而将全息过程数字化的计算全息图是一种更为广义的数字全息图^[2], 使得全息图制作更具灵活性, 所以一直受到人们的特别关注^[3,4], 并且朝着全息影视方向发展^[5]. 为了使数字全息图在立体显示中具有实用价值, 一方面必须解决计算速度, 为此人们提出了一些快速算法提高全息图计算速度^[6~9]; 另一方面必须解决三维物体隐藏面问题. 对于复杂三维场景, 要制作高质量的数字全息图, 必须进行隐藏面消除^[10]. 消除三维场景的隐藏面会增加数字全息图的制作时间, 如果完全模仿激光全息制作过程进行隐藏面消除, 则需要对全息图的每一个抽样单元进行消隐计算和处理, 仅完成这部分工作需要漫长的时间, 使数字全息变得不现实. 为解决这一问题, 本文根据人眼观察物体的特点, 将全息面分成若干个相邻的小区域, 每个区域对应特定的观察方向上人眼视觉可分辨的尺度, 用区域中心的消隐状态代表区域内每一个抽样单元的消隐状态, 这种快速消除复杂场景隐藏面的方法, 使隐藏面消除所需的时间对于全息图的制作时间来说是微不足道的. 本文给出了消隐快速算法在计算机模拟实验和制作复杂物体大视角数字彩虹全息图^[11]中应用的实验结果.

1 原理

1.1 数字全息图制作原理

计算机制作全息图, 采用的模型如图 1. 图中坐标系采用右手系, 全息面 H 位于 xy 坐标平面上, ABCD 为场景中的一个物体, 它自身发射或反射光波到全息面上. 因为反射物体可以等效为自发光物体, 这里将场景看作是自发光的. 由于数字计算机

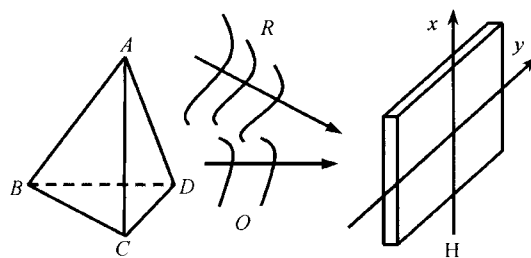


图 1 数字全息图制作模型

Fig. 1 Computational model of digital hologram

只能处理离散数据, 制作数字全息首先要将场景按显示分辨率需要离散化, 同时全息面上的点也要离散化. 这样, 场景中每一点发出的光也是角度离散化了的“光线”. 设离散化后场景中第 i 点 (x_i, y_i, z_i) 发出的“光线”在全息面上的复振幅分布为

$$O_i(x, y) = \frac{a_i}{r_i(x, y)} \exp \left\{ j \left[\frac{2\pi}{\lambda} r_i(x, y) + \varphi_i \right] \right\} \quad (1)$$

式中 a_i/r 是振幅, $r_i(x, y) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z_i^2}$ 为物点到全息面上点 (x, y) 的距离, λ 为波长.

再设全息面上参考光复振幅分布为

$$R(x, y) = \frac{b}{r} \exp \{ j\Psi(x, y) \} \quad (2)$$

采用双极强度计算方法^[9], 则全息面上干涉光强分布可表示为

$$I(x, y) = A + \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{r_i(x, y)} \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} r_i(x, y) + \varphi_i - \Psi(x, y) \right\} \quad (3)$$

式中 A 为直流偏置, 使强度非负, N 为场景中的总

* 国家自然科学基金(60477039)资助项目

Tel: 0579-2298863 Email: liyong@zjnu.cn

收稿日期: 2005-04-12

物点数。

在计算机中计算出全息面上的光强分布后,根据需要可将它以普通照相方式记录在全息干版或高分辨率胶片上,也可直接送到空间光调制器上实现全息图的直接再现。如果以视频速度再现全息图,可以实现全息影视。

1.2 消隐基本原理

在激光全息中由于光线被遮挡,隐藏面自然被消除。但在数字全息中必须在计算前将隐藏面消除,否则全息图再现时本该消除的光线也被再现出来与可见面干涉形成噪音,破坏了再现像质。由于光路可逆,从全息面上采样点出发,假设由全息面上采样点发光照亮场景,如图2。通过研究全息面上某点P发出的每条射线与场景的所有交点,可以发现

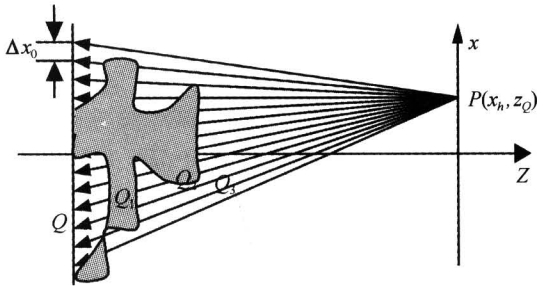


图2 隐藏面消除基本原理
Fig. 2 Basic principle of hidden surface removal

在每条射线上只有与P距离最近的交点才是对P点有效的物点,如PQ上的Q₃点。所以消隐的基本原理可表达为:由P点发出一系列射线,求出每条射线与场景的所有交点,再在每条射线上求距离P点最近的交点,求出的这些交点就是P所对应的有效物点集。对全息面上的每一采样点都要进行消隐。用一维情况说明本方法的数学原理。设距离全息图最远的与全息图平行的场景平面为Q₀平面;场景可以描述为:z=f(x);Q₀平面上的取样间隔为Δx₀;某物点投影在Q₀平面上的坐标为x_{Q_{0i}},则P点发出的射线形成一直线族

$$x = [(x_h - x_{Q_{0i}}) / z_{Q_0}]z + x_{Q_{0i}} \tag{4}$$

式中 $x_{Q_{0i}} = x_{Q_{01}} + i\Delta x_0 \quad (i=0, 1, 2, 3, \dots)$

对直线族中每条直线求解方程组

$$\begin{cases} x = [(x_h - x_{Q_{0i}}) / z_{Q_0}]z + x_{Q_{0i}} \\ z = f(x) \end{cases} \tag{5}$$

得到一系列解(x_{oj}, z_{oj}), j=0, 1, 2, 3, ...。对应P点有效的物点就在这些解中。然后计算这些点和P点的距离

$$d_{ji} = \sqrt{(x_{oj} - x_h)^2 + (z_{oj} - z_Q)^2} \tag{6}$$

在这条直线上d_{ji}值最小的物点,就是要找的有效物点。对每条直线都进行上述计算,得到一系列d_{ji}值最小的物点,它们的集合就是P所对应的有效物点

集。在数字全息图计算中对全息面上的所有采样点都要先求对应它的有效点集,然后计算复振幅。对于离散形式表示的场景,如三维测量数据,可以先进行三角化,即将数据点云转化为三角形面片来表示场景,上述讨论仍然适合。

1.3 消隐快速算法原理及计算量

在研究中发现如果直接按上述方法消隐,对全息面上每点都进行隐藏面消除。由于全息面上采样点数目庞大(10⁵点量级以上),使得数据处理速度缓慢,尤其对于大视角全息图(采样点10⁷点量级以上)的计算,对复杂场景至少按照目前的计算机速度水平,这种方法是不现实的。

为提高计算速度,在制作数字全息图时本文根据人眼观察场景的特点来进行消隐工作,对于直接观察的全息图,人眼是透过全息图的局部看到场景,如图3的AB。提出的消隐快速算法原理为:将全息面分成若干个相邻的小区域,每个区域对应特定的观察方向视觉可分辨的尺度,然后只对区域中心点采用1.2节提出的方法进行隐藏面消除,得到对应该区域的一组消隐后的场景数据,以此数据作为该区域所有采样点的有效物点集来计算复振幅分布。如图4,AB为全息面上的一个区域,在确定AB上每一点的有效物点集时,只确定中心点C的有效物点集,将它作为AB上所有点的有效物点集,这样就大大提高了消隐速度。

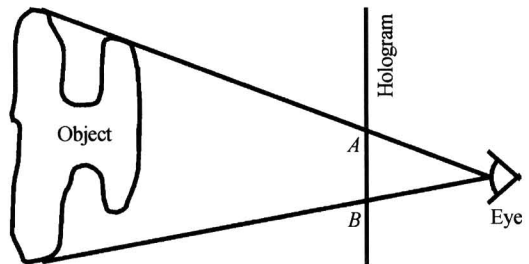


图3 人眼透过全息图观察场景
Fig. 3 Observing scene through hologram

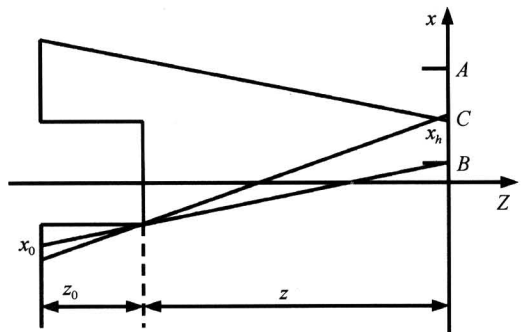


图4 制作参量与隐藏面关系
Fig. 4 Relationship of facture parameter and hidden surface

采用分区消隐后,要选择合适的区域参量才能保证消隐质量。区域参量的不同选择对于深度变化

缓慢场景影响比较轻,而对于深度骤变物体影响最严重.由于实际场景比较复杂,这里讨论参量选择对深度骤变物体隐藏面消除效果的影响.为讨论方便,以台阶物体一维情况为例讨论采用分区消隐时数字全息图制作参量与隐藏面消除效果之间的关系.在图 4 中,全息图位于 x 轴上,设区域 AB 的半宽度为 x_h ,物体下方两条实线所夹部分宽度为 x_0 .由于物体上方所发光波对 AB 上复振幅贡献情况与下方类似,这里仅讨论物体下方情况.在激光全息中 x_0 对应部分所发光波在 AB 上有贡献,但不同位置处贡献比例不同,越往上贡献越少;而采用以区域中心为投影点透视投影后,当区域位于高度变化点上方时,这部分对区域的贡献被忽略.由于人眼的分辨率是有限的,只要被忽略部分人眼无法分辨就可以满足要求.由图 4 的几何关系可得

$$x_0 = (z_0/z)x_h \quad (7)$$

而人眼的角分辨率为 $1'$ (2.9×10^{-4} 弧度),则人眼横向分辨率 d 可表示为

$$d = (z + z_0) \times 2.9 \times 10^{-4} \quad (8)$$

由式(7)和(8)可以得到人眼观看无失真的区域半宽度 x_h 与深度 z_0 、距离 z 的关系

$$x_h \leq \frac{z(z + z_0)}{z_0} \times 2.9 \times 10^{-4} \quad (9)$$

下面讨论两种消隐方法的计算量情况.设显示分辨率为 $M \times N$ 点,全息图尺寸为 $I \times J$ 点,区域尺寸为 $I' \times J'$ 点,由于只对区域中心点进行消隐,则分区中心消隐和全局逐点消隐的计算量之比为

$$\eta \approx \frac{M \times N \times I \times J / (I' \times J')}{M \times N \times I \times J} = \frac{1}{I' \times J'} \quad (10)$$

由上述分析可知,采用分区中心消隐法时,区域越小隐藏面消除效果越好,但处理速度越慢,而且区域小到一定程度时,对人眼观察来说隐藏面消除效果不变;区域越大隐藏面消除效果越差,但处理速度越快.实际制作时可以采用式(9)给出的极限参量计算,也可以在降低显示要求的情况下采用大区域,提高计算速度.

2 实验结果

为验证分区消隐时制作参量与消隐效果的关系,用图 4 中的一维有底台阶物体进行了模拟,采用数字全息制作程序制作全息图.参量如下: $z=300$ mm, $z_0=20$ mm,突出部分宽 10 mm,底部两边各宽 5 mm,全息图的区域宽度为 3.072 mm,用区域中心在 $x=-5$ mm 处消隐后获得的同一组数据计算了两块区域,一块就是进行消隐的区域,另一块区域中心在 $x=5$ mm 处.数字再现程序再现的结果见图 5,用与记录参考光共轭的再现光再现,像面在 300 mm

处.图 5(a)为中心在 $x=-5$ mm 处区域再现像,在图中可以看到隐藏面完全消除,数据也没有缺失,说明采用中心消隐是有效的.图 5(b)为中心在 $x=5$ mm 处区域再现像,左边圆圈中为隐藏面与可见面混叠部分,这部分像质变差;右边圆圈中为数据被不正确消除后留下的空洞.说明在一个太大的区域里用中心消隐后的数据制作全息图,再现像质量会变差.

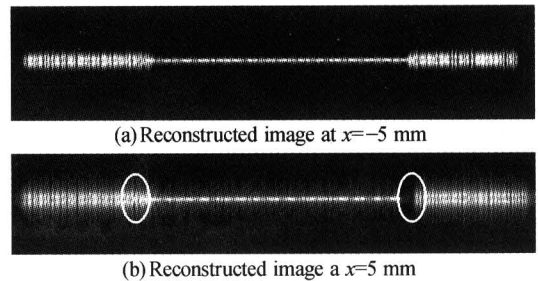


图 5 模拟结果

Fig. 5 Results of simulation

采用分区中心消隐方法制作了一幅复杂物体大视角数字彩虹全息图,这里用的是三维建模得到的人头模型,采用如下参量:人头三维数字模型的尺寸最大值选 20 mm \times 20 mm \times 20 mm,全息面选在离物体中分面 300 mm 处,全息图的视场宽度选 60 mm,全息图尺寸为 15000 \times 768 点,全息面各区域的尺寸为 1024 \times 768 点.图 6 为数字全息图片段、模型照片及实际再现结果.再现像正面和左侧面用 CCD 摄像机对全息图再现像拍摄获得.用眼睛观察,没有发现混叠和空洞现象,立体感强.实验中隐藏面

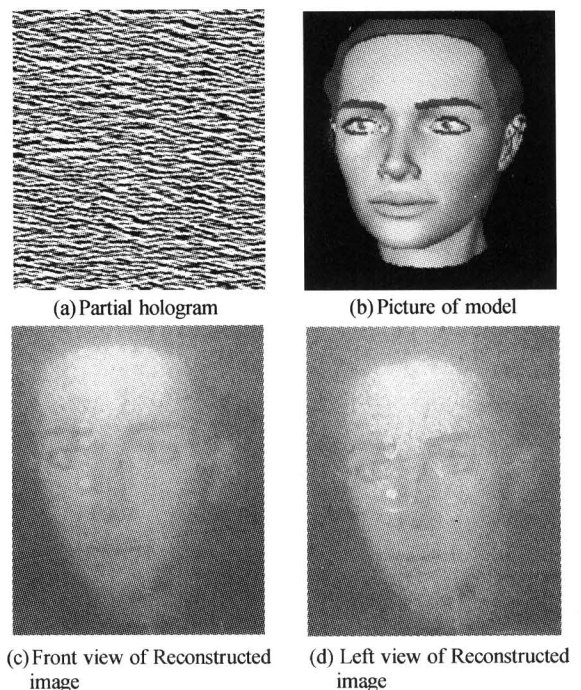


图 6 实验结果

Fig. 6 Experimental results

消除速度比全局逐点消隐提高了 10^5 倍量级。

3 结论

隐藏面消除问题是高质量复杂场景大视角数字全息制作的关键问题之一,如果直接模仿激光全息来逐点消除隐藏面,在目前计算机的计算能力下,由于计算量庞大使大视角复杂场景数字全息变得不现实。通过分析人眼的特点,提出了一种按视角将全息图分成多视角,各视角分别进行中心消隐的快速消隐方法,在满足显示需要的前提下极大地提高了消除速度(10^5 倍量级)。这种方法可使各个视角的隐藏面消除并行进行,并且能够与数字全息计算的各种快速算法相结合,实现数字全息的快速计算。

参考文献

- Schnars U, Kreis T M, Jüptner W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms; reduction of the spatial frequency spectrum. *Opt Eng*, 1996, **35**(4): 977~982
- 王辉, 苏显渝, 李勇, 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, Su X Y, Li Y, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 284~288
- Leseberg D. Computer generated holograms; cylindrical, conical, and helical waves. *Appl Opt*, 1987, **26**(20): 4385~4390
- Pastoor S, Wöpking M. 3-D Displays: A review of current technologies. *Displays*, 1997, **17**(2): 100~110
- Lucente M, St Hilaire P, Benton S A, et al. New approaches to holographic video. *Proceedings of the SPIE*, 1993, **1732**: 377~386
- 蔡晓鸥, 王辉, 李勇. 相息图的变频采样研究. *光子学报*, 2005, **34**(1): 114~117
Cai X O, Wang H, Li Y. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 114~117
- 金洪震, 李勇, 王辉. 利用差分方法实现相息图快速计算. *光电工程*, 2001, **28**(4): 30~33
Jin H Z, Li Y, Wang H. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(4): 30~33
- Li Y, Jin H Z, Wang H, et al. Research for horizontal parallax only kinoform in 3D display. *Chinese Journal of Lasers B*, 2002, **B11**(6): 465~468
- Lucente M. Interactive computation of holograms using a look_up table. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, **2**(1): 28~34
- 李勇, 苏显渝, 王辉等. 复杂三维场景数字全息图的隐藏面问题研究. *光子学报*, 2006, **35**(4): 591~594
Li Y, Su X Y, Wang H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 591~594
- 李勇, 王辉, 应朝福, 等. 大视角计算机彩虹全息研究. *光子学报*, 2003, **32**(5): 595~597
Li Y, Wang H, Ying C F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 595~597

A Fast Algorithm for Removing Hidden Surface of Complex Scenes in Digital Hologram

Li Yong^{1,2}, Su Xianyu¹, Wang Hui², Jin Hongzhen²

¹ Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064

² Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004

Received date: 2005-04-12

Abstract A fast algorithm is introduced to increase the speed of hidden surface removal, based on the spatial resolution of human eye. A hologram is divided into several regions according to different viewing position. Then, the data of scenes are obtained for every region by removing hidden surfaces corresponding to center point of the region. The operation of hidden surface removal is performed only once for one region instead of being performed for every sample in the region. The effects of removing hidden surfaces corresponding to center point of a region and which corresponding to every sample are the same for human eye, if the size of region is small enough. But the speed is accelerated greatly. The experimental results reveal that the speed of hidden surface removal is increased about 10^5 times. On the other hand, the quality of reconstructed image doesn't decrease.

Keywords Digital hologram; 3D display; Hidden surface removal; Fast algorithm



Li Yong was born in 1972 in Zhejiang, China. He received the B. S. degree from Zhejiang Normal University in 1994 and received his M. S. degree from Zhejiang University in 2003. He is working for his Ph. D. degree in optical information processing at Sichuan University. His research interests include optical information processing, optical 3D sensing and 3D display.