

漫反射三维物体计算全息图算法研究

李俊昌 桂进斌 楼宇丽 彭祖杰 宋庆和 蔡光程

(昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650093)

摘要 对三维虚拟物体的计算全息图算法进行简要分析。基于分析研究结果,将三维物体表面视为形状及位置不同的直角三角形面元的组合,导出一种便于计算的三维物体计算全息图算法,给出光滑表面的三维物体计算全息图实例。基于采样定理,对漫反射三维物体计算全息图的算法进行探索研究,给出漫反射三维物体计算全息图实例。

关键词 全息;空间曲面衍射计算;计算全息图;三维物体计算全息图

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.020903

Study of Creation Algorithm of Computer-Generated Hologram of Diffuse Reflection 3D Object

Li Junchang Gui Jinbin Lou Yuli Pen Zujie Song Qinghe Cai Guangcheng

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract A summarized analysis of computer-generated hologram algorithm of three-dimensional (3D) virtual object is presented. Based on the analysis results, 3D object surface is deemed to be a combination of right triangular area units with different shapes and locations. A convenient generation algorithm of computer-generated hologram is derived, and a calculation example of computer-generated hologram of smooth surface of 3D object is also presented. Based on sampling theory, the algorithm of calculating computer-generated hologram of diffuse 3D object is studied, and an example of computer-generated hologram of diffuse 3D object is given.

Key words holography; diffraction calculation of spatial curved surface; computer-generated hologram; computer-generated hologram of three-dimensional object

OCIS codes 090.1760; 090.2870

1 引言

计算全息是基于衍射的数值计算理论及计算机形成的一项新兴技术。计算机在空间光调制器(SLM)上生成全息图,用相干光照射全息图后,透射光能够完整重现三维(3D)物体的波前,具有重要的应用前景^[1~3]。近年来,随着计算机及空间光调制器技术的进步,计算全息图的形成及三维物体实像的显示逐渐成为国内外三维显示技术的一个研究热点,取得了不少成果^[1~18]。尽管这项技术取得了重要进展,但始终有两个问题制约着该技术的实际应用:其一是全息图的计算速度达不到实时显示的要求;其二是受目前市场光电显示器件的限制,无法获得大尺寸和大视场角的三维图像。

由于计算全息与数字全息涉及的均是相干光成像问题,近年来可变放大率数字全息图像重建的一些研究成果^[19~21]应能移植到大尺寸和大视场角的计算全息三维图像研究。因此,本文主要致力于第一个问题,即提高计算全息图计算速度的研究。目前国内外流行的算法中,主要存在将物体表面视为点源集合及微面元集合的两类算法。本文的分析研究表明,面元集合算法的计算速度通常优于点源集合的算法,对于面元集合算法进行深入研究是提高计算全息图形成速度的有效途径。为此,将三维物体表面视为形状及位置不同

收稿日期: 2012-09-17; **收到修改稿日期**: 2012-10-22; **网络出版日期**: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(60977007)资助课题。

作者简介: 李俊昌(1945—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光物理、信息光学等方面的研究。

E-mail: jcli@vip.163.com

的三角形面元的组合,将任意面元分解为两个直角三角形面元,导出任意形状三角形面元频谱的解析表达式,基于衍射角谱理论,形成一种便于计算的三维物体计算全息图算法,给出光滑表面的三维物体计算全息实例。基于采样定理,对漫反射三维物体计算全息图的算法进行探索研究,给出漫反射三维物体计算全息实例。

2 形成计算全息图的两类计算方法的讨论

2.1 点源集合的算法及存在的问题

将物体表面视为点源集合的算法是较传统的算法,简述如下。

在空间中建立直角坐标系 $Oxyz$,设记录全息图的平面为 $z = z_H$, (x_i, y_i, z_i) 是物体表面第 i 个点源的坐标,若能够对记录平面的光波场有贡献的点源数为 N ,且 $z_H > z_i$,则记录平面的光波场复振幅为

$$U(x, y) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{r_i} \exp[j(kr_i + \varphi_i)], \quad (1)$$

式中 $j = \sqrt{-1}$, $r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z_H - z_i)^2}$; $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光波长; A_i 和 φ_i 分别表示第 i 个点源的振幅和初始相位。

由于实际物体的表面通常为散射面,散射面可以视为大量相位随机取值的点元的集合^[22],将 φ_i 选择为 $0 \sim 2\pi$ 内的随机值,若所选择的点足够密集,这种算法能够较理想地模拟实际物体的发光过程。然而,在形成计算全息图时,为精确表示三维物体,密集的点源让 N 的取值非常庞大,需要长时间的计算。而对于实时形成全息图及显示图像,需要计算速度达到 25 frame/s,虽然目前国内外对如何提高点源算法的速度进行了大量研究^[3],但计算速度还较难达到要求。

2.2 物体表面视为面源集合的算法及存在的问题

为克服使用点源组成平面光源时需要大数量点光源而给数值计算带来的困难,将物体表面视为一定形状微小平面集合的算法是出现了。由于平面波照射三角形孔时透射波的频谱有解析解,2008年,Ahrenberg等^[23]基于衍射角谱理论以及 Tommasi等^[24,25]对倾斜发光面衍射计算的研究,提出将物体表面视为不同形状的光滑三角形面元集合的下述算法。

令物体表面由 N 个相互连接的三角形面元组成,第 i 个面元的频谱为 $G_i(f_x, f_y)$,通过数学变换^[25],将组成物体表面的三角形面元的频谱变换到邻近物体并垂直于记录平面的频谱平面 $W_i(f_x, f_y) = T[G_i(f_x, f_y)]$,若该平面到全息记录平面的距离为 d ,则到达全息图的光波场可以用角谱衍射公式表示为

$$U(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \left[\sum_{i=1}^N W_i(f_x, f_y) \right] \exp[jkd \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}] \right\}, \quad (2)$$

式中数学变换 $W_i(f_x, f_y)$ 是一个解析函数。容易对 N 个三角形面元的频谱进行求和运算,当完成求和运算并与传递函数相乘后,只需要一次傅里叶逆变换便能获得到达全息图的光波场。通常情况下,表示一个物体表面使用的三角形面元数量要比使用点源表示所运用的数量小很多,因此,尽管计算速度还不能达到 25 frame/s,面源集合算法是一种较有前景的计算方法。

然而,(2)式是基于三角形面元的傅里叶变换为解析解的前提得出的,其物理意义为三角形面元发出的光波是均匀平面波。因此,重建物体的表面由亮度均匀而光滑的三角形面元组成,不能有效显示较为接近实际的表面为散射面的三维物体。此外,由于频谱的数学变换 $W_i(f_x, f_y) = T[G_i(f_x, f_y)]$ ^[23~25] 繁杂,虽然文献[23]提出了一种三角形面元频谱的算法,但是不能用其公式获得正确的结果,稍后给出计算实例。

3 三角形面元频谱解析解的研究

由于文献[23]提供了十分有价值的计算思路,以下将任意三角形视为两个彼此相连的直角三角形的组合,导出便于计算的解析表达式。

任意形状三角形均能沿最长的边分解为两个直角三

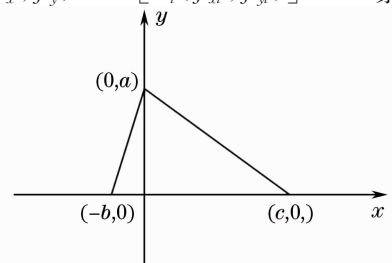


图1 三角形面元坐标定义

Fig. 1 Coordinates of triangular area units

角形,让三角形的最长边与直角坐标系 Oxy 的 x 轴重合,图 1 给出三个顶点坐标分别为 $(0, a)$, $(-b, 0)$, $(c, 0)$ 的三角形面元坐标定义。

令 $U_1(x, y, 0)$, $U_2(x, y, 0)$ 分别为图 1 中第一及第二象限的直角三角形面元的光波复振幅(在三角形内为 1,其余为 0),原三角形面元的傅里叶变换 $T_{\Delta}(f_x, f_y)$ 则为两直角三角形面元变换之和:

$$T_{\Delta}(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{U_1(x, y, 0)\} + \mathcal{F}\{U_2(x, y, 0)\} = T_1(f_x, f_y) + T_2(f_x, f_y). \quad (3)$$

根据图 1, (3)式右边两项可分别写为

$$T_1(f_x, f_y) = \int_0^c \exp(-j2\pi x f_x) dx \int_0^{a-ax/c} \exp(-j2\pi y f_y) dy, \quad (4)$$

$$T_2(f_x, f_y) = \int_{-b}^0 \exp[-j2\pi x f_x] dx \int_0^{ax/b+a} \exp[-j2\pi y f_y] dy. \quad (5)$$

经积分运算和整理后得

$$T_1(f_x, f_y) = -c \frac{\exp(-j2\pi a f_y)}{2\pi f_y} \times \frac{\exp[-j2\pi(c f_x - a f_y)] - 1}{2\pi(c f_x - a f_y)} + \frac{\{\exp[-j2\pi c f_x] - 1\}}{4\pi^2 f_y f_x}, \quad (6)$$

$$T_2(f_x, f_y) = b \frac{\exp(-j2\pi a f_y)}{-2\pi f_y} \times \frac{1 - \exp[j2\pi(b f_x + a f_y)]}{2\pi(b f_x + a f_y)} + \frac{1 - \exp(j2\pi b f_x)}{4\pi^2 f_y f_x}. \quad (7)$$

以上两式在进行计算时,会遇到分母为零的问题。为便于数值计算,进行以下 5 种分母为零情况的讨论。

1) 当 $f_x = 0$ 及 $f_y \neq 0$ 时, (4)、(5)式重新写为

$$T_1(f_x, f_y) = \int_0^c dx \int_0^{a-ax/c} \exp[-j2\pi y f_y] dy, \quad (8)$$

$$T_2(f_x, f_y) = \int_{-b}^0 dx \int_0^{ax/b+a} \exp[-j2\pi y f_y] dy. \quad (9)$$

经积分运算得

$$T_1(f_x, f_y) = \frac{c}{4a\pi^2 f_y^2} [1 - \exp(-j2\pi a f_y)] + \frac{jc}{2\pi f_y}, \quad (10)$$

$$T_2(f_x, f_y) = \frac{b}{4a\pi^2 f_y^2} [\exp(-j2\pi a f_y) - 1] - \frac{b}{j2\pi f_y}. \quad (11)$$

2) 当 $f_x \neq 0$ 及 $f_y = 0$ 时, (4)、(5)式重新写为

$$T_1(f_x, f_y) = \int_0^c \exp[-j2\pi x f_x] (a - ax/c) dx, \quad (12)$$

$$T_2(f_x, f_y) = \int_{-b}^0 \exp[-j2\pi x f_x] (ax/b + a) dx. \quad (13)$$

经积分运算得

$$T_1(f_x, f_y) = -\frac{jc^2 \exp(-j2\pi c f_x)}{2a\pi f_x} - \left(\frac{c}{4a\pi^2 f_x^2} - j \frac{a}{2\pi f_x} \right) [\exp(-j2\pi c f_x) - 1], \quad (14)$$

$$T_2(f_x, f_y) = -\frac{ja \exp(j2\pi b f_x)}{2\pi f_x} + \left(\frac{a}{4b\pi^2 f_x^2} + j \frac{a}{2\pi f_x} \right) [1 - \exp(j2\pi b f_x)]. \quad (15)$$

3) 当 $f_x = 0$ 及 $f_y = 0$ 时, (4)、(5)式积分是三角形面积:

$$T_1(f_x, f_y) = \int_0^c dx \int_0^{a-ax/c} dy = ac/2, \quad (16)$$

$$T_2(f_x, f_y) = \int_{-b}^0 dx \int_0^{ax/b+a} dy = ab/2. \quad (17)$$

4) 当 $f_x \neq 0$, $f_y \neq 0$ 以及 $cf_x - af_y = 0$ 时,对(4)式求 $(cf_x - af_y) \rightarrow 0$ 的极限得

$$T_1(f_x, f_y) = -c \frac{\exp(-j2\pi a f_y)}{2\pi f_y} + \frac{\exp[-j2\pi c f_x] - 1}{4\pi^2 f_y f_x}. \quad (18)$$

5) 当 $f_x \neq 0, f_y \neq 0$ 以及 $b f_x + a f_y = 0$ 时对(5)式求 $(b f_x + a f_y) \rightarrow 0$ 的极限得

$$T_2(f_x, f_y) = b \frac{\exp(-j2\pi a f_y)}{-2\pi f_y} + \frac{1 - \exp(j2\pi b f_x)}{4\pi^2 f_y f_x}. \quad (19)$$

为证明以上计算的可行性,令 $a=3 \text{ mm}, b=4 \text{ mm}, c=3 \text{ mm}$,图 2(a)给出三角形频谱的强度图像(为便于显示强度分布形貌,中央区域周围的强度扩大了 1000 倍)。图 2(b)是利用三角形频谱的计算值及快速傅里叶逆变换获得的三角形面元图像。

基于图 2 的三角形参数,现考察文献[23]提供的计算公式的可行性。根据文献[23]的(15)式,利用 $s_1 = -4 \text{ mm}, t_1 = 0; s_2 = 0, t_2 = 3 \text{ mm}; s_3 = 3 \text{ mm}, t_3 = 0$ 三组数据建立方程组后,可以求出该文(17)式所定义的雅可比行列式的元素,从而利用该文的(14)式及(19)式求出三角形面元的频谱。按照与图 2 相似的另一显示方式,图 3 给出对应的计算结果。可以看出,逆变换并未得到预先设计的三角形面元图像,该文提供的计算公式存在问题。

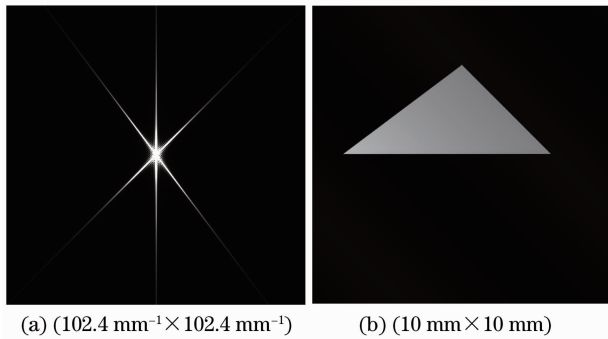


图 2 三角形面元的(a)频谱及(b)傅里叶逆变换重建图像

Fig. 2 (a) Spectrum and (b) reconstruction image of triangular area unit

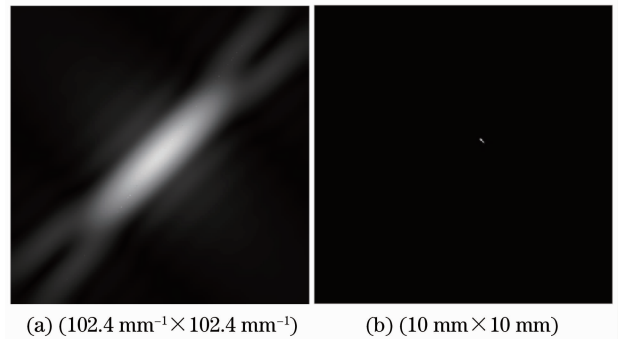


图 3 利用文献[23]公式的计算结果。(a)三角形面元频谱;(b)逆变换重建图像

Fig. 3 Calculation results of with the formulas in Ref. [23]. (a) Spectrum of triangular area unit; (b) reconstruction image by inverse transform

4 空间光滑曲面光源的衍射场计算

4.1 理论分析

令空间曲面光源由 N 个三角形面光源组成,图 4 给出空间曲面上第 k 个三角形面光源的坐标定义。图中 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 为主坐标,观测平面为 $\hat{z} = d$ 的平面。仿照图 1,在三角形面光源上建立面光源坐标 (x_k, y_k, z_k) ,令面光源坐标原点在主坐标中的位置为 $o_k(x_{0k}, y_{0k}, z_{0k})$,让三角形面元的最长边与 x_k 轴重合, y_k 轴过该边所对的三角形顶点。

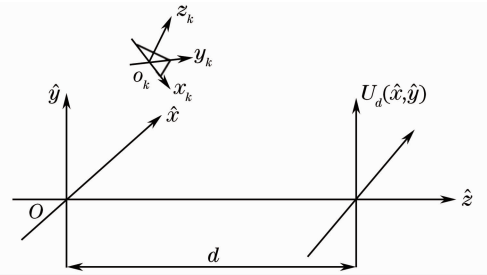


图 4 空间三角形面光源的坐标定义

Fig. 4 Coordinates of space triangular area unit source

设面光源坐标 (x_k, y_k, z_k) 和主坐标 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 间满足下述变换关系:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1k} & a_{2k} & a_{3k} \\ a_{4k} & a_{5k} & a_{6k} \\ a_{7k} & a_{8k} & a_{9k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} - x_{0k} \\ \hat{y} - y_{0k} \\ \hat{z} - z_{0k} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

令 λ 为光波长, $F_{k0}(\hat{f}_x, \hat{f}_y)$ 是 $\hat{z} = z_{0k}$ 平面上三角形面元的频谱,到达观测平面 $\hat{z} = d$ 的光波场频谱可以根据角谱衍射理论表示:

$$F_{kd}(\hat{f}_x, \hat{f}_y) = F_{k0}(\hat{f}_x, \hat{f}_y) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (d - z_{0k}) \sqrt{1 - (\lambda \hat{f}_x)^2 - (\lambda \hat{f}_y)^2} \right]. \quad (21)$$

$F_{k0}(\hat{f}_x, \hat{f}_y)$ 可以通过面光源在 $O_k-x_k y_k$ 平面的频谱 $T_{\Delta}(f_{xk}, f_{yk})$ 在频率空间的坐标变换及傅里叶变换的相

移定理求出：

$$F_{k0}(\hat{f}_x, \hat{f}_y) = T_{\Delta}[\alpha_k(\hat{f}_x, \hat{f}_y), \beta_k(\hat{f}_x, \hat{f}_y)] |J_k(\hat{f}_x, \hat{f}_y)| \exp[-j2\pi(x_{0k}\hat{f}_x + y_{0k}\hat{f}_y)], \quad (22)$$

式中

$$\begin{cases} \alpha_k(\hat{f}_x, \hat{f}_y) = a_{1k}\hat{f}_x + a_{2k}\hat{f}_y + a_{3k}\hat{f}_z \\ \beta_k(\hat{f}_x, \hat{f}_y) = a_{4k}\hat{f}_x + a_{5k}\hat{f}_y + a_{6k}\hat{f}_z \end{cases}, \quad (23)$$

$$J_k(\hat{f}_x, \hat{f}_y) = (a_{2k}a_{6k} - a_{3k}a_{5k}) \frac{\hat{f}_x}{f_z} + (a_{3k}a_{4k} - a_{1k}a_{6k}) \frac{\hat{f}_y}{f_z} + (a_{1k}a_{5k} - a_{2k}a_{4k}), \quad (24)$$

$$\hat{f}_z = \sqrt{1/\lambda^2 - \hat{f}_x^2 - \hat{f}_y^2}. \quad (25)$$

按照以上诸式逐一计算到达观测平面 $z=d$ 的每一面光源光波场频谱,则观测平面的光波场为

$$U_d(\hat{x}, \hat{y}) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \sum_{k=1}^N F_{kd}(\hat{f}_x, \hat{f}_y) \right\}. \quad (26)$$

4.2 计算实例

利用(26)式,可以实现三维物体的计算全息图的计算。设物体为半径 $R=3.33$ mm 的球体,图 5 给出一研究实例。为考查不同数量的三角形面元表现球面时重建图像的质量区别,图 5(a),(b) 给出沿 z 轴负向看到的半球面的两种不同的三角形面元分解方式。此外,为让球体的重建像能充分展示三维形貌,在形成计算全息图时,三角形面元振幅选择为 $1+0.5|\mathbf{N}_k \cdot \mathbf{N}_0|$ ($\mathbf{N}_k, \mathbf{N}_0$ 分别是第 k 个面元外法向单位矢量及重建球面上最亮点的外法向单位矢量)。选择最亮点在第二象限重建球面中央,图 5(c),(d) 是利用计算全息图面的衍射场及衍射的逆运算重建的球体像。可以看出,振幅的选择让重建球面右下方出现“反光”,较好地展现了球体形貌。其余相关参数为:光波长 532 nm,重建平面通过球心,重建平面宽度 10 mm,距离全息图 200 mm。不难看出,三角形面元尺寸越小,重建图像越逼真。

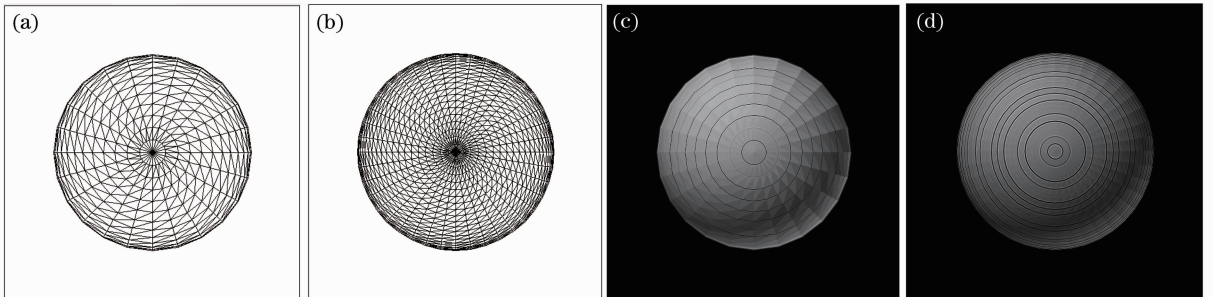


图 5 虚拟球体的计算全息模拟研究实例。(a) 552 三角形面元;(b) 1580 面元;(c) 552 三角形面元重建像;(d) 1580 三角形面元重建像

Fig. 5 Example of computer-generated hologram of virtual sphere. (a) 552 triangles; (b) 1580 triangles; (c) reconstruction image of 552 triangles; (d) reconstruction image of 1580 triangles

5 漫反射三维物体的计算全息图计算

理论研究指出^[22],当发光物体表面为散射面时,可以利用计算机语言提供的随机函数,让微小面光源的相位在 $0 \sim 2\pi$ 中随机取值,将物体表面视为相位随机取值的微小面光源的组合。由于均匀三角形面元的频谱具有解析解,将研究物体用尺寸足够小的三角形面元表示,只要面元尺寸甚大于光波长,满足使用标量衍射理论的条件,并且三角形面元宽度小于或等于满足取样定理的间距,原则上便能利用(26)式模拟或实际计算受激光照射下的空间曲面物体的散射波的传播。

将球体表面视为相位随机取值的微小三角形面光源的组合,并让每一面光源发出的光波沿光轴方向传播,图 6(a),(b) 给出到达记录平面的衍射场强度图像及根据衍射逆运算重建的球体图像。相关计算参数为:光波长 $\lambda=532$ nm,球体半径 3.33 mm,球心到全息图面距离 $d=200$ mm,1580 三角形面元表示半球面。

从图 6(a)可以看出,到达观测屏的衍射场是散斑场,与散射光性质的理论预计吻合^[23]。

6 讨 论

比较图 5 及图 6 的重建像可以看出,按照光滑表面处理所得的图像不但显得明亮,而且灰度变化连续均匀,而按照散射表面处理的物体重建像相对昏暗,相邻三角形面元边界处还出现不连续的灰度变化。因此,三角形面元相位的取值变化能直接影响重建物体材质的视觉感受。利用任意彩色能分解为三基色的原理,让计算全息图能显示出具有不同色彩及材质的物体,是值得继续探索的课题。

应该指出,无论采用点源集合或面源集合的算法,提高计算速度满足实时显示的需要始终是研究工作。应用研究表明,物体表面结构越复杂,需要使用的点源或面元越多,计算时间越长。利用本文的面元集合计算方法,在常用微机上用 Delphi7 编程计算图 6 中 1580 面元图形需要 20 s 左右,计算速度与实时显示的要求还有很大距离。

从理论上讲,表示连续分布物体的表面使用的三角形面元数量通常要比使用点源表示所用的数量小很多,因此,若不采取特别措施,采用点源表示法的计算量更大。但是,由于点源表示法计算简单,人们进行过提高计算速度的大量研究^[3]。例如,可以将某一空间区域视为一三维离散点源的集合,预先计算出这些点源在全息图平面的光波复振幅,计算结果形成数组存入计算机内存。在实际运算时,可以通过空间插值的方法构成需要在该空间区域显示的物体表面。相对而言,由于面元组合的计算方法复杂,提高计算速度的研究还鲜见报导。但是,与物体表面的实际结构相适应,用面元形象而逼真地表示物体表面是必须的。

7 结 论

将三维物体表面视为形状及位置不同的三角形面元的组合,导出了任意形状三角形面元频谱的解析表达式及计算方法。基于研究结果,形成一种便于计算的三维物体计算全息图算法。并且,基于采样定理,对漫反射三维物体计算全息图的快速算法进行了探索研究,分别给出具有光滑表面及漫反射面的三维物体计算全息实例。

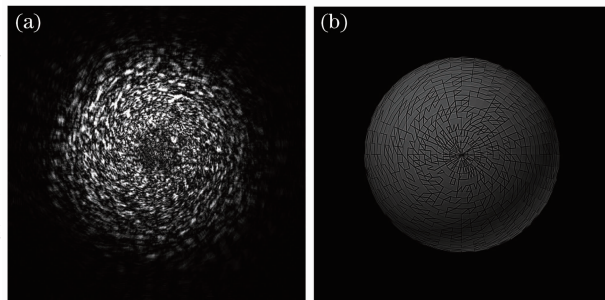


图 6 散射球面衍射场计算实例。(a)散射球体的衍射场;(b)衍射逆运算重建图像

Fig. 6 Calculation example of diffraction field of scattering sphere. (a) Diffraction field; (b) reconstructed image of diffraction inverse operation

参 考 文 献

- 1 P.-A. Blanche, A. Bablumian, R. Voorakaranam *et al.*. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. *Nature*, 2010, **468**(7320): 80~83
- 2 Hao Zhang, Jinghui Xie, Juan Liu *et al.*. Optical reconstruction of 3D images by use of pure-phase computer-generated holograms[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(12): 1101~1103
- 3 Jia Jia, Wang Yongtian, Liu Juan *et al.*. Progress of dynamic 3D display of the computer-generated hologram[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(5): 050002
- 4 贾 甲,王涌天,刘 娟等. 计算全息三维实时显示的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(5): 050002
- 5 M. Huebschman, B. Munjuluri, H. Garner. Dynamic holographic 3-D image projection[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 437~445
- 6 Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito. A color holographic reconstruction system by time division multiplexing with reference lights of laser[J]. *Opt. Re.*, 2003, **10**(5): 339~341
- 7 Kunihiro Sato, Atsuhiko Sugita, Masakazu Morimoto *et al.*. Reconstruction of full-color images with a RGB time-sharing holographic display system[C]. *SPIE*, 2006, **6030**: 603004
- 8 Tomoyoshi Ito, Koji Okano. Color electroholography by three colored reference lights simultaneously incident upon one hologram panel[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(18): 4320~4325
- 9 Atsushi Shiraki, Naoki Takada, Masashi Niwa *et al.*. Simplified electroholographic color reconstruction system using graphics processing unit and liquid crystal display projector[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(18): 16038~16045

- 9 Aneta Michalkiewicz, Malgorzata Kujawinska, Jerzy Krezel *et al.*. Phase manipulation and optoelectronic reconstruction of digital holograms by means of LCOS spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2005, **5776**: 144~152
- 10 C. Slinger, C. Cameron, S. Coomber *et al.*. Recent developments in computer-generated holography: toward a practical electroholography system for interactive 3D visualization[C]. *SPIE*, 2004, **5290**: 27~41
- 11 Stanley, Mark A. Smith, Allan P. Smith *et al.*. 3D electronic holography display system using a 100-megapixel spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2004, **5249**: 297~308
- 12 H. Zhang, J. Xie, J. Liu *et al.*. Elimination of zero-order beam induced by pixelated spatial light modulator for holographic projection[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(32): 5834~5841
- 13 Tu Zhengzheng, Tang Jin, Shi Dong. Dynamic holographic stereogram display based on DMD and fractional Fourier transform[J]. *Computer Technology and Development*, 2009, **19**(8): 247~249
涂铮铮, 汤进, 史东. 基于DMD和分数傅里叶的动态全息体视图显示[J]. 计算机技术与发展, 2009, **19**(8): 247~249
- 14 Jin Hongzhen, Lou Yimin, Wang Hui *et al.*. Integral color hologram of virtual 3D object generated by integral photography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1304~1309
金洪震, 楼益民, 王辉等. 基于集成照相术制作虚拟三维物体彩色全息图的新方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1304~1309
- 15 Li Yong, Su Xianyu, Wang Hui *et al.*. Research on hidden surface of complex scenes in digital hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 591~594
李勇, 苏显渝, 王辉等. 复杂三维场景数字全息图隐藏面问题研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(4): 591~594
- 16 Yuan-Zhi Liu, Jian-Wen Dong, Yi-Ying Pu *et al.*. High-speed full analytical holographic computations for true-life scenes [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3345~3351
- 17 Hao Zhang, Neil Collings, Jing Chen *et al.*. Full parallax 3D display with occlusion effect using computer generated hologram[J]. *Opt. Engng.*, 2011, **50**(7): 074003
- 18 Huadong Zheng, Tao Wang, Linmao Dai *et al.*. Holographic imaging of full-color real-existing three-dimensional objects with computer-generated sequential kinoforms[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(4): 040901
- 19 Junchang Li, Patrice Tankam, Zujie Peng *et al.*. Digital holographic reconstruction of large objects using a convolution approach and adjustable magnification[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(5): 572~574
- 20 Junchang Li, Zujie Peng, Patrice Tankam *et al.*. Digital holographic reconstruction of a local object field using an adjustable magnification[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2011, **28**(6): 1291~1296
- 21 Li Junchang, Song Qinghe, Gui Jinbin *et al.*. Research of image plane filtering technique in digital holographic wavefront reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900135
李俊昌, 宋庆和, 桂进斌等. 数字全息波前重建中的像平面滤波技术研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(9): 0900135
- 22 W. Lauterborn, T. Kurz, M. Wiesenfeldt. *Optique Cohérente*[M]. Paris: Masson, 1993. 75
- 23 Lukas Ahrenberg, Philip Benzie, Marcus Magnor *et al.*. Computer generated holograms from three dimensional meshes using an analytic light transport model[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1567~1574
- 24 T. Tommasi, B. Bianco. Frequency analysis of light diffraction between rotated planes[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(8): 556~558
- 25 K. Matsushima, H. Schimmel, F. Wyrowski. Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(9): 1755~1762