

doi: 10.3788/gzxb20144305.0509001

三维点云物体频谱获取方法

简献忠¹, 周海¹, 杨鑫², 侯乐鑫¹, 郭强³

(1 上海理工大学 上海现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

(2 苏州大学 信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

(3 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要:为了简化三维物体计算全息数据和加快计算时间,提出了一种三维点云物体频谱获取方法.在分析频谱获取方法模型的基础上,由不同视角的投影图像(视图)与对应的平面波因子相乘积分的方法得到了三维点云物体频谱;介绍了视图获取算法,使用 Matlab 并行计算得到了一个三维‘鸟’的视图序列;根据实际物体频谱分布情况,采用高阶高斯概率分布减少视图获取数量;通过视图序列得到三维物体的频谱,采用傅里叶逆变换得到物空间内一个平面的复振幅分布,将其衍射一段距离,编码为菲涅尔全息,并进行了模拟再现和实验验证.模拟再现和实验结果表明:只需要原总视图的 17.75% 可以获得高质量的再现效果,验证了频谱获取方法的可行性及视图获取简化模型的正确性.所获取的三维物体频谱可以通过一定方式编码成多种全息进行三维显示,拓宽了该频谱获取方法的应用范围.

关键词:全息;计算全息;三维频谱;傅里叶变换;三维点云物体;视图

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)05-0509001-6

A Method for Spectrum Extraction of 3D Object with Object Points

JIAN Xian-zhong¹, ZHOU Hai¹, YANG Xin², HOU Le-xin¹, GUO Qiang³

(1 Shanghai Key Lab of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2 Institute of Information Optics Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 210056, China)

(3 National Weather Satellite Center, Beijing 10081, China)

Abstract: To simplify the calculation of three-dimensional objects and accelerate the computation time about holographic data, a method for spectrum extraction of 3D object with object points was presented. The spectrum method for model was analyzed and the spectrum could be derived from the integration of a perspective image multiplied by a factor of a specific plane wave. The algorithm for perspectives generation of an object was discussed in detail. The parallel computation with Matlab language was used to reduce the computational burden. And a 3D bird was tested with this method to generated perspectives. Based on the spectrum distribution of real object, a simplified extraction model with high order Gauss probability distribution was proposed which could hugely reduce the number of perspectives needed to form 3D spectrum. The inverse Fourier transform was used to get complex amplitude distribution in a plane of object field and the result was diffracted and added a reference wave in order to code as Fresnel hologram. The numerical reconstruction and experiment indicate that only 17.75% of the total original views can get high-quality reconstructed image and validity of the proposed method. The 3D spectrum can be coded as different kind of holograms for 3D display and it extends the application of 3D spectrum.

Key words: Holography; Computer-generated hologram; 3D spectrum; Fourier transform; 3D object with object points; Perspectives

OCIS Codes: 090.1760; 070.4790; 100.2960

基金项目:国家自然科学基金(No. 41075019)资助

第一作者:简献忠(1969-),男,教授,博士,主要研究方向为全息、嵌入式技术应用等. Email:jianxz@usst.edu.cn

收稿日期:2013-08-20;录用日期:2013-12-17

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

计算全息显示^[1-4]是目前三维显示研究领域中的一个热点,被认为是完美的3D显示技术,与其它显示技术相比,它能够提供更准确再现原物的物光场分布,被广泛地应用于艺术品展示、防伪等多个方面^[5-7].

计算全息生成算法有多种方法^[8-11],其中一种是将物体视为发光点的集合^[12],所有发光点发出的球面波在全息面上的复振幅叠加为物光波,与参考光干涉形成全息.该方法模型简单直观,然而巨大的计算量是制约该方法的重要因素.之后的研究中众多学者对该模型进行了改进,提出了多种查找表全息算法^[7, 13-14],能够很大程度提高全息计算时间,然而,查找表算法对于计算机存储空间要求比较大.Yatagai^[15]等人提出通过三维傅里叶变换获取物体频谱的方法,但是计算及数据处理繁琐.如果能够采取一种方法来获取三维点云物体的频谱,那么采用傅里叶逆变换获取物空间一个平面的复振幅分布,则可以方便快速地编码为各种类型的全息.基于这样的思路,本文提出了一种三维点云物体频谱获取方法,并详细地分析了该算法模型,总结出三维点云物体频谱可以由不同视角的投影图像(视图)与对应的平面波因子相乘,之后积分得到;给出了不同视角图像计算方法,最终将得到的三维点云物体频谱转换为物空间一平面的复振幅分布.

通过菲涅尔衍射,将物空间复振幅分布编码为非涅尔全息,进行了实验再现;为了进一步减少视图获取数量,提出了采用高阶高斯概率分布模型,来随机的获取各个视角的视图,大大减少了视图数量,通过全息再现结果的比较,表明该高斯概率模型是非常有效的,也说明了本文所提方法的正确性,这为计算全息提供了一种思路.

1 三维点云物体视图获取算法及简化模型

1.1 三维点云物体频谱算法模型

如图1所示,将三维物体看做是空间点的集合,为了描述简单,图中给出三个空间点,一束平行光照明空间物点,将会在透镜焦平面上形成三维物体空间频谱分布.如图所示,A、B、C三点发出的光线 Aa_1 、 Bb_1 、 Cc_1 为一组平行光线,将会形成焦平面上一点 F_1 ,同理 Aa_2 、 Bb_2 、 Cc_2 平行线将聚焦于焦平面上 F_2 ; P_1 和 P_2 为与两个传播方向垂直的截面,当获取了物点在截面上的投影振幅,该截面上的振幅与表示该方向的平面波传播因子相乘,积分后可以得到对应该传播方向上的复振幅分布.

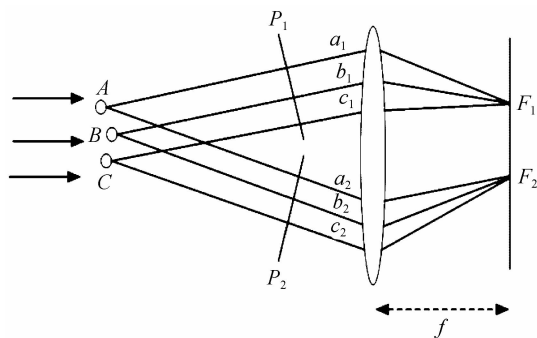


图1 三维点云物体频谱获取模型

Fig. 1 The model to extract 3D spectrum of an object

假设一个空间物点发出的一束光线与 x 和 y 方向的夹角为 θ_x 和 θ_y ,照明波长为 λ ,则对应的空间频率为

$$f_x = \frac{\sin(\theta_x)}{\lambda}; f_y = \frac{\sin(\theta_y)}{\lambda} \quad (1)$$

投影平面的坐标为 (x_p, y_p) ,一个视角的投影图像振幅为 $A(x_p, y_p)$,则在焦平面上频率为 (f_x, f_y) 的复振幅分布表示为

$$F(f_x, f_y) = \sum_{x_p, y_p} A(x_p, y_p) \exp[-i2\pi(f_x x_p + f_y y_p)] \quad (2)$$

因此,当三维点云物体各个方向投影图像得到后,可以通过式(2)求出所对应的每个空间频率的复振幅,从而得到三维点云物体的3D频谱.

1.2 三维点云物体视图获取算法

对于点云物体,每一个物点,彩色物体包含6个数据($x-y-z, r-g-b$),灰度物体包含4个数据($x-y-z, gray$),表示该点的空间坐标和所对应的彩色值(灰度值).

对于一个特定的视角,首先对所有点云物体的空间坐标进行坐标旋转,设原始坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,旋转之后的坐标为 (x_n, y_n, z_n) ,三个坐标方向的旋转角度为 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$,则转换关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = R_x R_y R_z \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 R_x 、 R_y 、 R_z 为三个方向的旋转矩阵,分别表示为

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & \sin(\theta_x) \\ 0 & -\sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & -\sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & \sin(\theta_z) & 0 \\ -\sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对于转换后的新坐标 (x_n, y_n, z_n) ,对 z_n 从大到小排序,并根据 z_n 的排序情况对 $x_n, y_n, r, g, b(x_n, y_n, \text{gray})$ 相应的排序.同时分别求出新坐标下 x_n 和 y_n 的最大值和最小值,从而求出窗口长 l_{x_n} 和窗口宽 w_{y_n} .假设该观察窗口内的采样间隔为 dx_n, dy_n ,则窗口的采样点数为 $m=l_{x_n}/dx_n, n=w_{y_n}/dy_n$.建立一个 m 行 n 列的全零的标记矩阵flag,并且建立一个buffer,对于彩色3D物体,buffer矩阵为 m 行 n 列3通道矩阵,对于灰度图,buffer为 m 行 n 列矩阵;

通过循环来确定buffer中某一位置的颜色值(灰度值),对于某一个物点,重新排序后的 x_n 和 y_n ,找到窗口中最接近的坐标位置,判断与该位置对应的标记矩阵是否是0,如果是0则将与 (x_n, y_n, z_n) 对应的颜色值(灰度值)存储在buffer对应位置,并将标记矩阵对应位置设置为1;如果该位置对应的标记矩阵为1,则说明之前的计算中已经存入空间点颜色(灰度)信息,该点是被之前的空间点遮挡的,不进行操作.

通过对所有经过重新排序后的物点循环计算,最终buffer中保存个该视角下可观察到的图像.对于不同视角,则重新进行计算,得到不同视角下投影的图像.不同视角的计算相互独立,因此可以采用并行计算的方法进行.本文采用Matlab的并行计算,基本原理是,首先在Matlab的command window中输入Matlabpool,打开并行计算池;然后在视角生成的循环中,采用parfor循环对计算池进行任务分配.实现了不同视角图像的快速计算.

1.3 视图获取的简化模型

在视角计算时,假设 θ_x 和 θ_y 的范围分别在 -20° 到 20° 之间,取样点为 256×256 ,为此,需要获得频域内 256×256 点的频谱分布,需要的图像是65536幅,虽然采取并行的方式来计算视图,所花费的时间比较多.

在图1所示的模型中,每个物点所发出光波的衍射角,是由物体的精细结构所决定的,对于实际的物体,其频谱能量更多的集中在低频部分.

因此本文提出一种高阶高斯概率分布模型,目的在于减少视图的数量,对视图进行一定的筛选,对于小衍射角的低频部分,生成较多的视图,而高频部分,按照小概率生成少量的视图.其表达式为

$$G(u, v) = \exp[-(u^2 + v^2)^n/a] \quad (5)$$

式中 n 为阶数, a 为一比例因子, u 和 v 是生成高阶高斯分布时的二维坐标.假设 u 和 v 的取值范围在 -2 和 2 之间,取样点数均为256. a 一定的情况下, n 值越大,所生成的高斯模型高频抑制越强,即筛选出的高频信息对应的视图越少,则复现的图像越模糊当 n 确定时, a 越大,高斯模型所能选择的低频范围越大,对应的频谱越接近于原来频谱.

选择合适的参量,使得对高频所对应图像能够抑制,并且复现的图像产生的模糊能够接受是一个重要的参量原则.

图2中给出 $n=4, a=0.5$ 和 $a=1$ 时的高斯分布,以及 $n=2, a=0.5$ 时的概率分布,说明了视图选择与参量选取的关系.

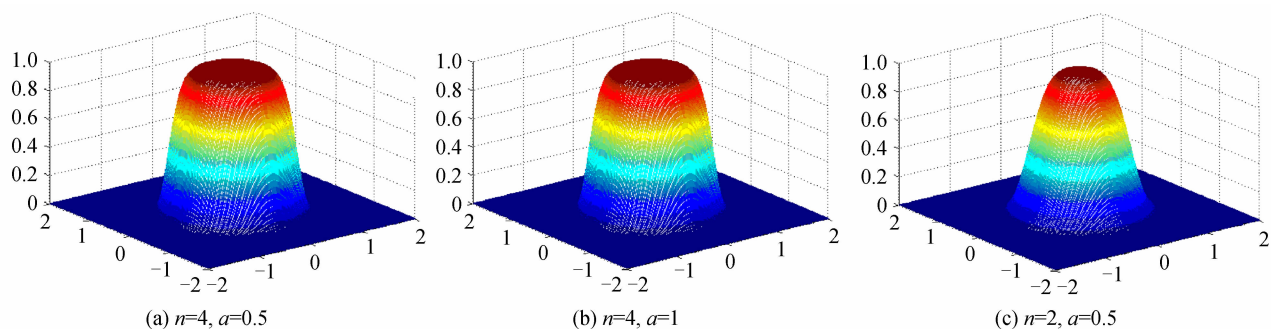


图2 高阶高斯概率模型分布

Fig. 2 The probability model of high order Gauss distribution

对于一个视角,首先生成一个随机数,当该随机数小于高斯概率模型分布在该对应点处的值时,该视图将会被计算.通过该模型,可以很大程度上减少视图获取的数量.

2 实验及结果分析

2.1 仿真

本实验首先用3DMAX软件在计算机中建立了一个鸟的三维模型,获取该模型的三维点云数据,该模型为一个灰度模型,总点数为18204,大小为 $(5.691 \times$

$3.4137 \times 3.0985) \text{mm}^3$.所采集的视图对应的 θ_x 和 θ_y 分别从 -20° 到 20° ,采样间隔均为 0.1563° ,视图数为 256×256 .图3给出通过视图获取算法所得到3D鸟模型的三个视图.

采用式(2),求出该三维鸟模型的频谱,图4(a)和图4(b)分别为频谱幅值和相位.

通过图4的幅值可以看出,频域内的主要信息集中在低频部分,与文中之前的分析一致.采用1.3节中提出的视图获取简化模型($n=4, a=1$)进行视图的计算.

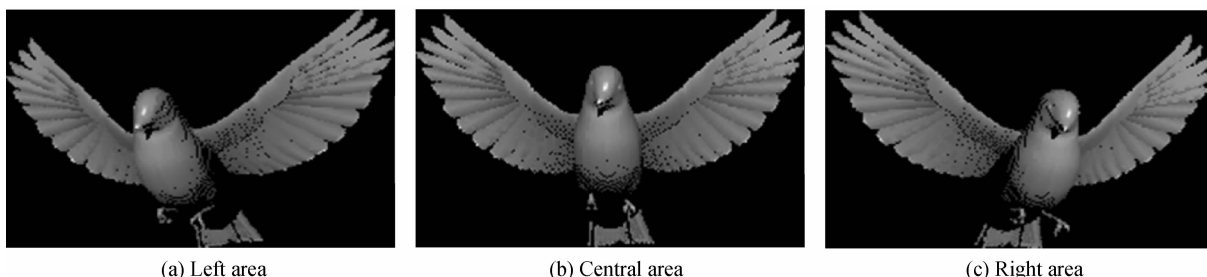


图3 三维鸟模型获取的三个视图
Fig.3 Three perspectives of 3D bird model

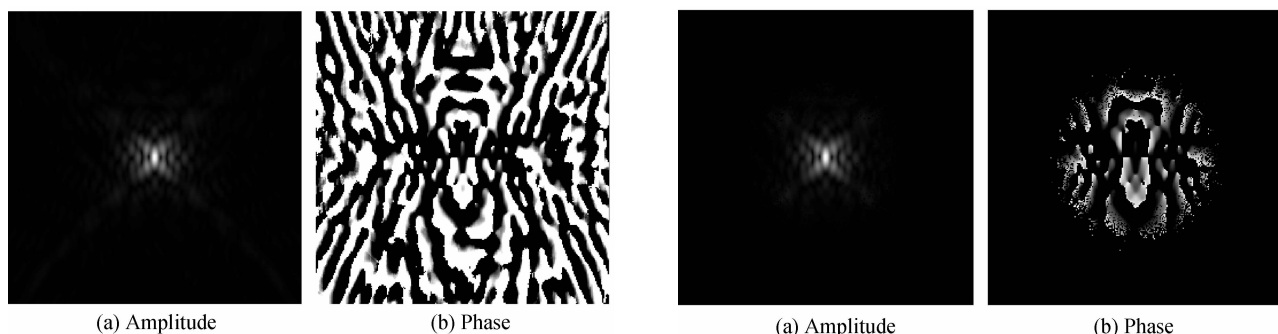


图4 三维鸟模型频谱幅值和相位

Fig.4 The amplitude and phase of 3D bird mode

图6 简化模型下获取的三维鸟模型频谱幅值和相位

Fig.6 The amplitude and phase of 3D bird model in simplified extraction model

图5给出了随机计算的视图分布,图中的亮点表示该点的视图被计算,黑点表示该对应位置的视图不被计算. 总共的有效视图为 11 634,为原总视图的 17.75%,视图数量大大减小了. 简化模型下计算得到的三维模型频谱幅值和相位分布如图6.

求出 $z=0.3$ m 处的复振幅分布,并与参考光叠加,采用博奇编码得到菲涅尔全息图,参考光的表达式为

$$R(x_z, y_z) = \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} x \sin(\theta_r) \right] \quad (7)$$

全息编码表达式为

$$I(x, y) = 0.5 \left\{ 1 + A(x, y) \cdot \cos \left[\frac{2\pi x}{\lambda} \sin(\theta_r) - \varphi(x, y) \right] \right\} \quad (8)$$

式中 $A(x, y)$ 是物光的归一化振幅, $\varphi(x, y)$ 表示为物光相位, θ_r 为参考光夹角, λ 为波长.

全息计算参量:采样间隔 $8.1 \mu\text{m}$,分辨率为 1920×1200 ,波长为 $632 \mu\text{m}$,全息面距离物面距离为 0.3 m,参考光夹角为 8° .

分别计算了全部视图及视图简化模型下的菲涅尔全息图.图7给出两种模型下的仿真结果,图7(a)和图

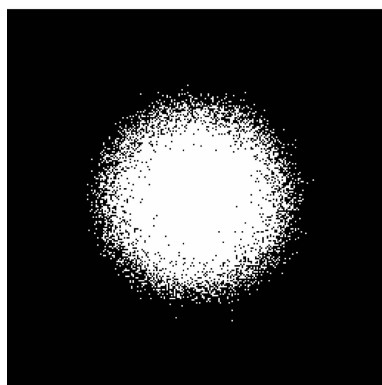
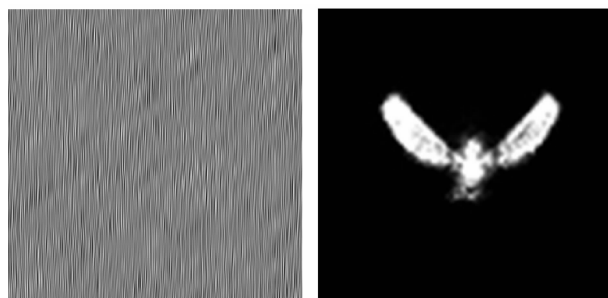


图5 高阶高斯概率模型视图获取模型

Fig.5 The mask for perspectives generation with high order Gauss model

将所获取的三维模型频谱进行傅里叶逆变换,得到物空间一个平面内的复振幅分布 $U(x_o, y_o)$,然后采用菲涅尔衍射公式

$$O(x_z, y_z, z) = \frac{1}{i\lambda z} \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} z \right) \exp \left[i \frac{\pi}{\lambda z} (x_o^2 + y_o^2) \right] \cdot \iint U(x_o, y_o) \exp \left[i \frac{\pi}{z\lambda} (x_z^2 + y_z^2) \right] \cdot \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda z} (x_z x_o + y_z y_o) \right] dx_o dy_o \quad (6)$$



(a) Hologram in the first extraction model

(b) Reconstruction

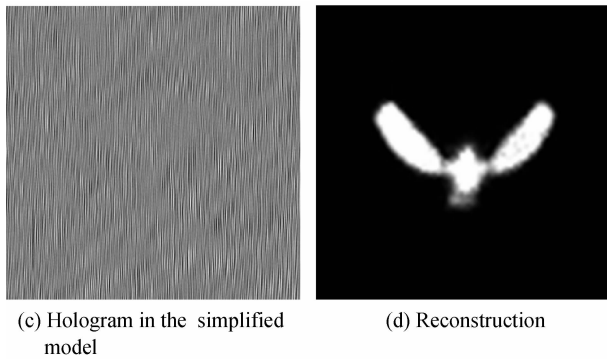


图 7 两种模型的仿真结果

Fig. 7 The results of the two models in the simulation
7(b)分别为原采集模型下菲涅尔全息局部图和仿真的再现结果,图 7(c)和图 7(d)分别为简化模型下菲涅尔全息局部图和仿真的再现结果.

从图 7(b)和图 7(d)中的仿真再现结果可以说明所获取的三维频谱方法及简化模型方法的可行性.

2.2 实验结果分析

为了进一步加以说明,本文将原模型及简化模型计算获取的全息图通过空间光调制器再现系统进行实验再现.实验装置如图 8 所示,图中 A 为氦氖激光器,波长为 632 nm;B 为扩束准直镜,对输出激光进行扩束准直;C 为中性密度滤波片,对激光光强进行衰减,以便观察;D 为空间光调制器,采用德国 Holoeye 公司制造的反射型硅基液晶空间光调制器 LC-R 1080,该型号为振幅型空间光调制器,分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 200$,像素尺寸 $8.1 \times 8.1\ \mu\text{m}^2$.本文通过该实验装置获得两种模型的全息再现结果,如图 9 所示,其中所获取的图像均选择最佳效果时拍摄.

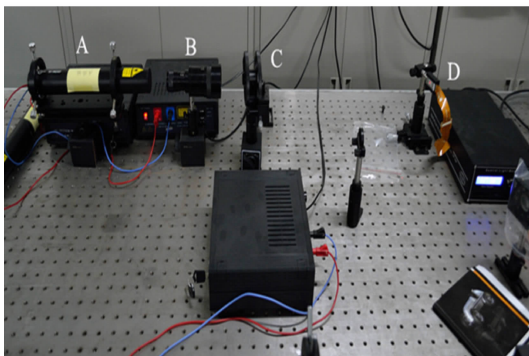


图 8 基于空间光调制器的全息图再现系统

Fig. 8 Reconstruction system based on spatial light modulator

通过图 7(b)、图 7(d)及图 9 可知,模拟和实验下两种模型均可以得到再现像.原模型及简化模型复现像均存在模糊,由于三维物体,成像于一个平面,多数物点处在离焦状态简化模型较为严重,原因在于视图获取时,较多对应的高频视图丢弃所引起的,而简化模型视图数是原视图数量 17.75%,大大减少了三维物

体频谱获取的时间,而且取得了较好的再现效果.

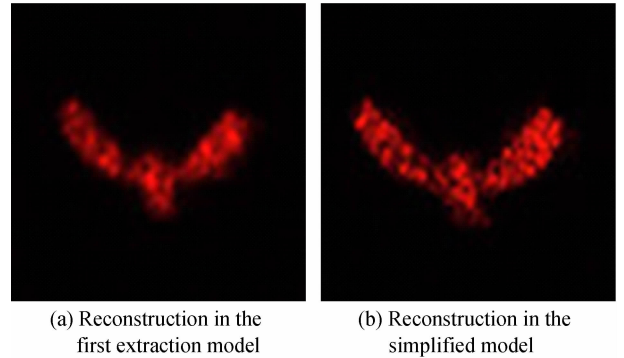


图 9 两种模型的实验结果

Fig. 9 The results of the two models in the experiment

3 结论

本文提出了一种三维点云物体频谱获取方法,将物点发光看做是不同传播方向光线的集合,不同传播方向对应于不同空间频率.首先获取不同传播方向(视角)的投影图像,然后乘以平面波因子,积分得到与该传播方向对应的频谱面上一点复振幅;详细地分析了视图获取算法,采用 Matlab 的并行计算来加速视图序列的计算;同时,根据实际物体频谱特征,提出了采用高阶高斯概率分布模型来采集视图序列,大大地减少了视图序列的采集,相比于原模型,视图数为原视图数的 17.75%;最后将两种模型下获取的三维频谱分别进行傅里叶逆变换,得到位于物平面内的复振幅分布,通过菲涅尔衍射,算出一定距离处的全息分布,进行了实验再现;实验结果证明了本文提出的三维点云物体频谱获取方法的可行性,也说明了简化模型的重要意义,为在海量数据处理中如何用少量数据复原原信息提供了一种新的思路,为下一步定性分析参数的选择与再现高质量图像的效果关系奠定了良好的基础.

三维点云物体的频谱获取后,可以将其直接编码为傅里叶全息,或者如本文编码的菲涅尔全息,或者傅里叶逆变换后编码为像面全息,通过全息的光学再现,从而能够实现虚拟物体的可视化.

参考文献

- [1] WYANT J C. Computer generated holograms[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(2): 1-1.
- [2] SHAKED N T, KATZ B, ROSEN J. Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(34): H120-H136.
- [3] YOSHIKAWA H, YAMAGUCHI T. Computer-generated holograms for 3D display[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(12): 1079-1082.
- [4] TAKAKI Y, IKEDA K. Simplified calculation method for computer-generated holographic stereograms from multi-view images[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(8): 9652-9663.
- [5] YANG Xin, LI Yong, WANG Hui, et al. Color difference of computer generated rainbow hologram based on numerical

- reconstruction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 331-335.
- 杨鑫,李勇,王辉,等. 利用数值再现实彩虹全息色差评价[J]. 光子学报, 2013, **42**(3): 331-335.
- [6] OKADA N, SHIMOBABA T, ICHIHASHI Y, *et al.* Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(7): 9192-9197.
- [7] SHIMOBABA T, NAKAYAMA H, MASUDA N, *et al.* Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(19): 19504-19509.
- [8] ZHENG Hua-dong, YU Ying-jie, CHENG Wei-ming. Computer-generated Hologram calculation for spatial reconstruction of three-dimensional object [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2008, **16**(5): 917-924.
- 郑华东, 于瀛洁, 程维明. 三维物体空间再现技术中的全息图计算[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(5): 917-924.
- [9] TRESTER S. Computer-simulated Fresnel holography [J]. *European Journal of Physics*, 2000, **21**(4): 317.
- [10] ABOOKASIS D, ROSEN J. Computer-generated holograms of three-dimensional objects synthesized from their multiple angular viewpoints[J]. *JOSA A*, 2003, **20**(8): 1537-1545.
- [11] NISHITSUJI T, SHIMOBABA T, KAKUE T, *et al.* Fast calculation of computer-generated hologram using the circular symmetry of zone plates[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(25): 27496-27502.
- [12] BAI X H, WANG L, REN Y P. Reflection holography for three-dimensional display based on computer-generated holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 591-595.
- 拜晓慧, 万琳, 任亚萍. 利用反射全息实现计算全息三维显示[J]. 光子学报, 2012, **41**(5): 591-595.
- [13] KIM S C, KIM E S. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(19): D55-D62.
- [14] KIM S C, KIM E S. Fast computation of hologram patterns of a 3D object using run-length encoding and novel look-up table methods [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(6): 1030-1041.
- [15] SANDO Y, ITOH M, YATAGAI T. Full-color computer-generated holograms using 3-D Fourier spectra [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(25): 6246-6251.