

# 基于衍射光学元件色散特征的三维建模系统

吕银环 王汝笠 柴震海 傅艳红

(中国科学院上海技术物理研究所光电中心, 上海 200083)

**摘要** 为了重建复杂形状的三维物体, 在此提出了一种便捷的基于衍射光学元件(DOE)色散成像特性的三维建模算法, 该算法在一种新型的三维建模系统中实现, 它充分利用了 DOE 在红外波段的模式投影和探测. 给出了重建复杂形状的三维物体的仿真试验结果, 证明该算法及系统的有效性和可行性.

**关键词** 三维建模算法; 三维重建; 衍射光学元件; 色散成像特性

**中图分类号** TN911.73

**文献标识码** A

## 0 引言

一个识别系统的基本任务是从现实世界中尽可能精确地识别物体并定位该物体, 因此, 三维物体的识别明显优越于二维. 近几年, 三维识别已逐步成为一热门研究课题, 而三维识别的首要条件是三维参考物体和被测物体必须被预先建模. 已有大量文献提出多种三维建模算法, 其中, 典型的算法包括双目成像建模<sup>[1]</sup>、立体交集建模<sup>[2]</sup>、基于投影几何建模<sup>[3]</sup>、基于多透视图建模<sup>[4]</sup>、分层成像建模<sup>[5,6]</sup>、贝叶斯表面模型<sup>[7]</sup>、相移数字全息<sup>[8,9]</sup>建模、基于 FTP 技术<sup>[10]</sup>的建模、光谱法三维重建<sup>[11]</sup>. 其中一些基于多视角的方法<sup>[1-4]</sup>受限于系统参量, 并需要繁重的计算量. 本文提出一种新的便捷三维建模算法, 该算法充分利用了 DOE 红外波段的色散成像特性的模式投影和探测优势, 可以通过获取调制光栅模式, 并充分利用 DOE 的色散成像特性, 恢复物体的三维形状信息. 此算法在一新奇的三维建模系统可以很好地实现, 仿真结果证明该算法对重建复杂形状的三维物体是非常有效的, 并且是可行的.

## 1 三维建模算法

一般透镜成像所依据的是折射理论, 在特定波长  $\lambda$  的焦距跟对应材料的折射率  $n(\lambda)$  有关

$$f(\lambda) = c_0 / [n(\lambda) - 1] \quad (1)$$

式中  $c_0 = r_1 r_2 / (r_2 - r_1)$  是与透镜表面曲率半径有关的常量. DOE 是一种多阶相位透镜, 其焦距仅仅跟其表面微结构的变化和波长  $\lambda$  有关, 即

$$f(\lambda) = r_p^2 / 2\lambda \quad (2)$$

式中  $r_p$  表示波带周期半径, 由式(2)可见, 对于特定设计结构, 不同的波长所对应的衍射透镜有效焦距不同, 波长的变化带来 DOE 的纵向色散, 也就是说, DOE 的成像理论具有纵向色散特征. 在 DOE 的成

像理论中, 由于波长不等, 相等的物距对应于不同的像距. 像距可以通过波长来计算, 于是, 物体高度信息可以根据这些等高面图像的像距计算. 物体的二维图像信息可直接由这些图像获得. 于是, 三维景象模型可根据此原理进行重建.

DOE 的设计波长为  $\lambda_0$ , 设计焦距为  $f(\lambda_0)$ , 物距为  $s_0$ , 波长变量为  $\Delta\lambda$ , 上面所有的参量, 有效焦距为

$$f(\lambda_0 + \Delta\lambda) = f(\lambda_0) \lambda_0 / (\lambda_0 + \Delta\lambda) \quad (3)$$

像距可以由如下方程计算出

$$s_i(\lambda_0 + \Delta\lambda) = s_0 / [s_0 / f(\lambda_0 + \Delta\lambda) - 1] \quad (4)$$

由 CCD 相机的传感面上获得的变形光栅模式表达如下

$$g(x, y) = a(x, y) + 0.5b(x, y) \cdot \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \quad (5)$$

使用傅里叶方法探测出条纹模式的局部对比度<sup>[12]</sup>. 傅里叶方法探测条纹模式的空间位相, 但要通过傅里叶变换的方法获取基本分析信号

$$c(x, y) = 0.5b(x, y) \exp \{ i [2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \} \quad (6)$$

我们可以用条纹振幅  $b(x, y)$  测量条纹对比度. 条纹对比度刚好是物体等高面上二维图像强度分布. 三维景象可以由这些模式图像重建. 建模算法和流程图如图1所示. 在流程图1中, 可调谐激光器发

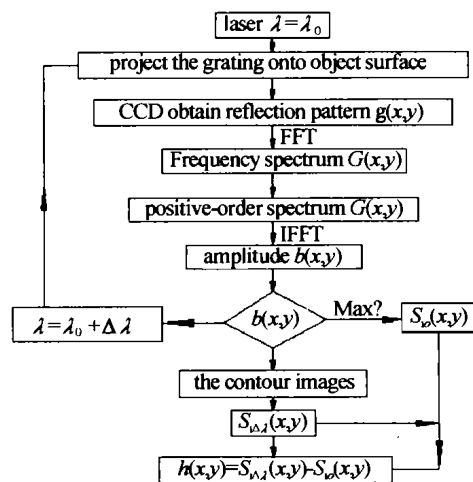


图1 建模三维物体的算法流程图  
Fig. 1 The algorithm flowchart for modeling 3D object

出不同波长的光,波长的初始值设为  $\lambda_0$ ,该波长投影并精确地把光栅成像在物体的底面上. 物体的底面作为参考平面  $s_{i_0}(x, y)$  去计算物体的高度信息,然后,变化波长  $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$  投影光栅并把它成像在物体的一系列等高面上. 通过傅里叶方法估计条纹振幅的最大值来获取相应位置的精确成像平面,并计算出此成像位置  $s_{i\Delta\lambda}(x, y)$ ,重复该过程获取物体的高度信息.

## 2 三维建模系统

图 1 所示的算法在如图 2 所示的三维建模系统中实现. 使用一个可调谐激光器投影光栅,通过 DOE<sub>1</sub> 透镜把光栅成像到物体的表面上,通过 CCD 相机记录变形光栅模式. 使用分束镜建构投影透镜和观察透镜的共轴光路. 使用可变波长的激光器光源投影光栅,并根据不同的波长成像在物体的不同等高平面上. 使用另一个 DOE<sub>2</sub> 观察透镜,把这些共轭图像二次成像到 CCD 相机的传感面上. 于是,该系统不需要移动传感器平面,就可以精确地获得对应于物体不同高度分布的各个等高面的图像. 这些图像被输入到计算机进行处理,然后,可以从等高平面图像根据不同的波长计算出高度分布. 这样,高度信息和二维图像信息可以同时获得重建,所以此三维重建系统所提三维建模算法是实用的和可行的.

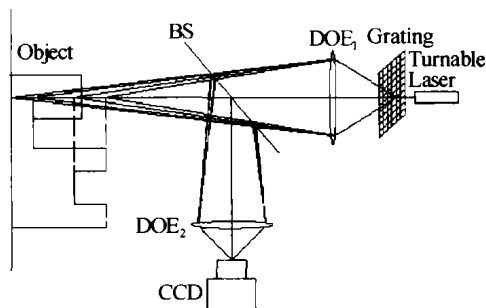


图 2 三维建模系统  
Fig. 2 The 3D modeling system

## 3 仿真实验结果

如图 2 所示的三维建模系统充分利用了 DOE 的红外波段的模式投影和探测的光谱特性. 由于该系统投影采用主动式照明和环境因素对该波段影响较其他波段小,红外波段更适合于三维物体的建模. 另外,此波段的光谱分离更容易实现. 这可以通过理论仿真该系统的光学传递函数证明.

为了简化起见,我们限定成像系统为理想的几何光学系统. 在处理过程中,假设每个波长有一个变量  $\Delta\lambda'$ ,该理想光学系统的几何光学点扩散函数有衍射斑直径

$$R = \Delta\lambda' D / [2(\lambda_0 + \Delta\lambda)] \quad (7)$$

$$h(x, y, \Delta\lambda') = \begin{cases} 1: (x^2 + y^2)^{1/2} \leq R \\ 0: (x^2 + y^2)^{1/2} > R \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $D$  为有效通光口径,该系统中 DOE<sub>1</sub> 透镜的 OTF<sub>L1</sub> 表达为

$$H(f_x, f_y; \Delta\lambda') = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y; \Delta\lambda') \exp[-2\pi i(f_x x + f_y y)] dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y; \Delta\lambda') dx dy} = \frac{J_1[2\pi(f_x^2 + f_y^2)^{1/2} R]}{\pi(f_x^2 + f_y^2)^{1/2} R} \quad (9)$$

$J_1$  为一阶贝塞尔函数,图 3(a) 为不同中心波长

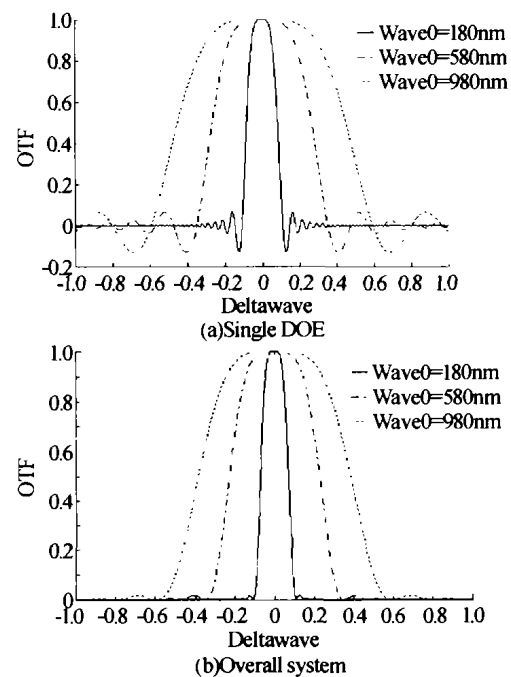


图 3 不同中心波长周围波长变化为  $\Delta\lambda' = [-10 \text{ nm}, +10 \text{ nm}]$  时, OTF 的变化

Fig. 3 The variation of the OTF at the different center wavelength range with a variety  $\Delta\lambda' = [-10 \text{ nm}, +10 \text{ nm}]$

周围波长变化为  $\Delta\lambda' = [-10 \text{ nm}, +10 \text{ nm}]$  时的 OTF 的变化. CCD 的成像透镜 DOE<sub>2</sub> 作为观察透镜,我们所提方案整个系统的 OTF 以如下关系式给出

$$OTF = OTF_{L1} * LTF_{L2} * OTF_{CCD} \quad (10)$$

$$OTF_{CCD} = \sin(wk/2) / (wk/2) = \text{sinc}(wk/2) \quad (11)$$

式中,  $w$  为像素间隔,  $k$  为空间频率 (line/mm). 系统中采用两个相同的 DOE, 最终得出系统的 OTF 为

$$H(f_x, f_y; \Delta\lambda') = \left\{ \frac{J_1[2\pi(f_x^2 + f_y^2)^{1/2} R]}{\pi(f_x^2 + f_y^2)^{1/2} R} \right\}^2 * \text{sinc}[w * (f_x^2 + f_y^2)^{1/2} / 2] \quad (12)$$

由于不平滑的物体表面充当一随机的屏,并通过 DOE<sub>2</sub> 被成像到 CCD 的感光面上. 取  $w = 15 \mu\text{m}$  进行系统仿真,在不同中心波长周围,波长变化为  $\Delta\lambda' = [-10 \text{ nm}, +10 \text{ nm}]$  时的整个系统 OTF 的变化如图 3(b).

从图 3(b) 中,可以很清楚地看出红外波段较其

他波段更适合于重建三维物体,因为在该波段, $\Delta\lambda' = [-10 \text{ nm}, +10 \text{ nm}]$ 的变化对成像质量影响更小. 等高面的精确成像更容易获得,并且不需要很大的工作量.

仿真物体如图 4 (a) 和 (b) 表示了不同高度部分的视图,图中标记 0~4 分别表示参考面、第一至第四面. 图 5(a)到图 5(f)为二维光栅及其成像到物体的不同等高面上的仿真结果,也就是分别对应于  $\lambda = \lambda_0, \lambda_0 + \Delta\lambda_1, \lambda_0 + \Delta\lambda_2, \lambda_0 + \Delta\lambda_3, \lambda_0 + \Delta\lambda_4$  的

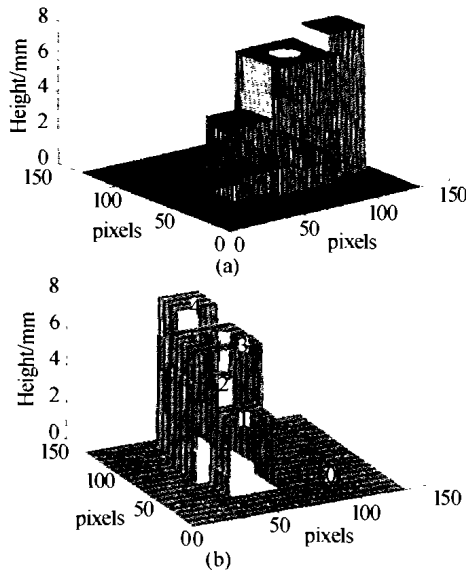


图 4 (a) 仿真物体, (b) 不同角度的物体视图  
Fig. 4 (a) The simulation object figure; (b) The different view section of object

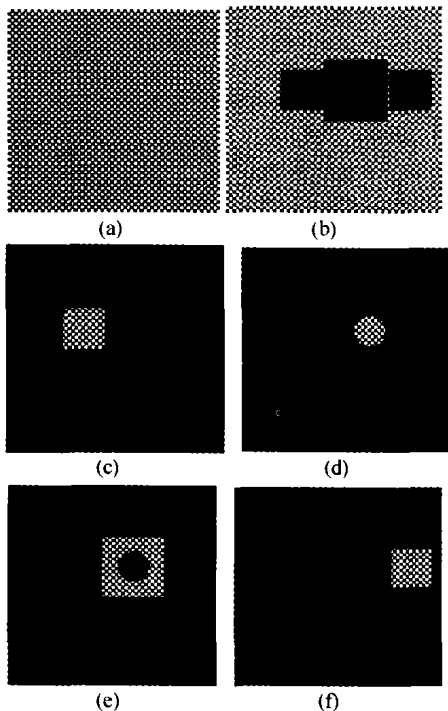


图 5 二维光栅及其投影到仿真物体上的二维模式条纹对比度的变化  
Fig. 5 2D grating and the variation of the fringe contrast of the 2D grating pattern projected onto the simulation object

参考面以及第一至四面上的图像  $s_{i_0}(x, y), s_{i_{\Delta\lambda_1}}(x, y), s_{i_{\Delta\lambda_2}}(x, y), s_{i_{\Delta\lambda_3}}(x, y), s_{i_{\Delta\lambda_4}}(x, y)$ . 重建结果如图 6 所示.

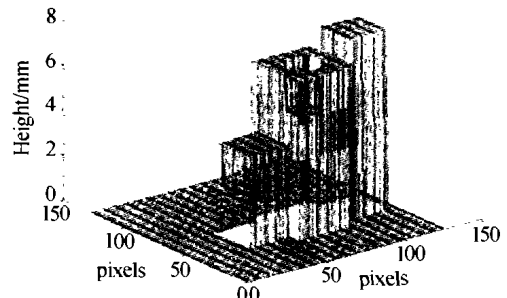


图 6 重建的物体  
Fig. 6 The reconstructed object

仿真结果证明了我们的三维建模系统对重建复杂形状的三维物体是有效的并且可以实现. 该复杂形状可以包含深洞和大的不连续性.

### 4 结论

为了重建带有深洞和大的非连续性复杂形状的物体,我们提出了一种新的三维建模算法,此算法在一种新奇的三维建模系统中实现,该系统充分利用了 DOE 红外波段的成像光谱特性. 仿真结果表明该算法可以准确地重建此类复杂形状的三维物体.

### 参考文献

- 1 Faugeras O D, Toscani G. The calibration problem for stereo. in: Proceedings of CVPR'86, Miami Beach, FL, USA: 1986, 15 ~ 19
- 2 Michel J, Nandhakumar N. Improved volume intersection methods for 3D object modeling. *Proc of SPIE*, 1994, **2233**: 212 ~ 223
- 3 Achour K, Benkhalif M M. A new approach to 3D reconstruction without camera calibration. *Pattern Recognition*, 2001, **34**:2467 ~ 2476
- 4 Niem W. Robust and fast modeling of 3D natural objects from multiple views. *Proc of SPIE*, 1994, **2182**:388 ~ 397
- 5 Baker S, Szeliski R, Anandan P. A layered approach to stereo reconstruction. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Santa Barbara, CA, June 1998
- 6 Szeliski R, Anandan P, Baker S. From 2D Images to 2.5 Sprites: A Layered Approach to modeling 3D Scenes. *IEEE, International Conference on Multimedia Computing and Systems*, 1999, **1**:44 ~ 50
- 7 Freeman W T, Viola P A. Bayesian model of surface perception. In *Adv. Neural Information Processing Systems 10*. MIT Press, 1998
- 8 Yamaguchi I. Phase-shifting digital holography. *Optics Letters*, 1997, **22**(16):1268 ~ 1270
- 9 Javidi B, Tajahuerce E. Three-dimensional object recognition by use of digital holography. *Optics Letters*, 2000, **25**(9): 610 ~ 612

- 10 Jose J, Esteve-Taboada, Mas D, *et al.* Three-dimensional object recognition by Fourier transform profilometry. *Applied Optics*, 1999, **38**(22):4760 ~ 4765
- 11 冯华君,徐之海,李奇,等. 光谱法计算机三维成像与再现系统. *光子学报*,2000,**29**(2):117 ~ 119  
Feng H J, Xu Z H, L Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(2):117 ~ 119
- 12 Takeda M, Aoki T, Miyamoto Y. Absolute three-dimensional shape measurements using coaxial and coimage plane optical systems and Fourier fringe analysis for focus detection. *Opt Eng*, 2000, **39**(1):61 ~ 68

### 3-dimensional Modeling System Based on the Chromatic Dispersion Characteristic of Diffractive Optical Element

Lü Yinhuan, Wang Ruli, Chai Zhenhai, Fu Yanhong

*Opto-Electronic Engineering Research Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083*

Received date:2003-08-11

**Abstract** For the absolute and shape-free reconstruction of 3-D objects, a convenient 3-dimensional modeling algorithm is proposed and implemented in a novel modeling system, which takes full advantage of the chromatic dispersion characteristic of Diffractive Optical Element (DOE) for infrared wave band pattern projection and detection. Experimental simulation results demonstrate that the complex free-form shape 3-D objects can be reconstructed, and prove this algorithm and reconstruction system are effective and realizable.

**Keywords** 3D modeling algorithm;3-D reconstruction;DOE;Chromatic dispersion characteristic



**Lü Yinhuan** was born in 1974. she received her master's degree in diffraction optics from Changchun Institute of Optics and Fine Machines. Her master's paper was completed in the State Key Laboratory, Changchun Institute of Optics and Fine Machines and Physics. The research direction is simulation and analysis of application of diffractive optical elements in imaging spectrum. Now she is studying for a Ph. D. degree. She majors in optical-electronic information processing and pattern recognition.