

基于二维彩色图像和深度图的复杂三维场景的计算全息图

曹雪梅 桑新柱 陈志东 冷俊敏 张明 郭南 余重秀 徐大雄

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 提出了利用二维彩色图像和深度图生产计算菲涅耳全息图的方法。把二维彩色图像按深度图分为多层物面信息,并把每层物面深度值转换为菲涅耳衍射距离。根据层析法原理,采用单步菲涅耳衍射算法,即可得到三维场景的计算全息图。研究结果显示该方法可以正确地对复杂三维场景进行全息图的记录和再现。利用强度叠加法对再现像进行散斑去除,提高了再现三维图的质量。

关键词 全息;深度图;层析法;单步菲涅耳衍射算法;强度叠加法

中图分类号 TN26 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0609002

Computer Generated Hologram of Complex Three-Dimensional Object Based on a Two-Dimensional Color Image and the Depth Map

Cao Xuemei Sang Xinzhu Chen Zhidong Leng Junmin Zhang Ming

Guo Nan Yu Chongxiu Xu Daxiong

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The computer generated Fresnel hologram of a complex three-dimensional (3D) object is synthesized based on a two-dimensional (2D) color image and a stereo matched depth map. The intensity of the color image is divided into multiple slices based on the depth map. The depth value of each slice is transformed into the distance of Fresnel diffraction. According to the principle of tomography, the hologram of the whole 3D scene can be achieved with the single step Fresnel diffraction method. The results show that the method can record and reconstruct the complex 3D object correctly. Intensity superposition method is used to suppress the speckle noise in the reconstructed images, which improves the representation quality significantly.

Key words holography; depth map; tomography; single step Fresnel diffraction; intensity superposition method

OCIS codes 090.1760; 090.2870; 100.6950

1 引言

自 Gabor^[1]发明全息术后,全息技术就得到了广泛的关注。它与传统的照相技术不同,全息技术是对三维(3D)物体的干涉记录,它同时记录了物体的振幅和相位信息,可以通过衍射再现三维场景。传统全息技术^[2]都需要在暗室中采用激光对 3D 物体进行干涉记录,需要极为稳定的实验环境,限制了

全息术的应用。计算全息图(CGH)^[3-4]不仅不受传统全息技术的限制,还可利用 3D 物体的数据信息来合成全息图。它可以产生数字模型的全息图,因而具有独特的优点和很大的灵活性,已被广泛应用于 3D 成像和各种滤波器的设计等领域^[5-8]。

空间结构复杂的 3D 物体,难以用具体函数描述其物光波的分布,而且 3D 物体信息量大,增加了

收稿日期: 2013-11-04; **收到修改稿日期**: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61177018)、教育部新世纪优秀人才项目(NECT-11-0596)、北京市科技计划重点项目(D121100004812001)、北京市科技新星项目(2011066)

作者简介: 曹雪梅(1985—),女,博士研究生,主要从事全息和三维显示技术等方面的研究。

E-mail: caoxuemeibj@gmail.com

导师简介: 桑新柱(1977—),男,博士,教授,主要从事三维显示、光信息处理和新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: xzsang@gmail.com

计算 3D 物体全息图的难度。应用较多的是基于点云^[9-11]的计算全息方法,该方法是逐一计算各物点在全息图上的光场并进行叠加来得到全息图,需要较大数据量才能保证较好的再现效果;其次,基于纵向剖面的计算全息方法是利用各个剖面的轮廓来构成三维物体^[12-13],通过计算各个剖面对全息图光场的影响并进行叠加得到全息平面的光场;此外,有学者提出基于三角面片^[14-15]的计算全息方法,该方法采用计算机图形学中的三角形面片来模拟曲面物体的外表面,利用成熟的计算机图形学技术从所构造的三维模型中提取出计算全息所需的信息。

三维物体全息图具体计算方法主要有:多视角投影合成法^[16-17]、菲涅耳波带法^[11,18]、层析法^[18-19]、分数傅里叶变换法^[20-21]、平面波角谱法^[22-23]和体对视法^[24]等。这些方法都存在各自的优缺点。其中,多视角投影合成法算法复杂;菲涅耳波带法用于纯位相型物体的全息图计算时,认为各物点振幅相同,当各物点的振幅不同,需计算不同灰度级下的菲涅耳波带;分数傅里叶变换法容易实现全息图的数值再现,但需采用特殊设计的全息透镜才可获得正确的光学再现效果;平面波角谱法仅适用于倾角不大、面型简单的倾斜面型 3D 物体的全息图计算;层析法简单快速,它认为 3D 物体是由多层截面构成,每层物面对菲涅耳全息图的贡献可由菲涅耳衍射计算得到,将各层面对全息图复振幅分布的贡献迭加后,加入参考光即可获得原物体的全息图。但是目前的层析法的主要研究对象为利用简单平面物体虚拟构造的 3D 物体^[18-19]。

本文利用二维彩色图像和立体匹配得到的深度图对复杂 3D 场景合成计算菲涅耳全息图。将二维彩色图像按深度图分层得到多层物面信息,把每层物面的深度值转换成其菲涅耳衍射的距离信息。将

每层物面信息进行菲涅耳衍射后并叠加即可得到全息面的全部物场信息,加入参考光后,可获取 3D 场景的全息干涉条纹。利用强度叠加法很大程度地提高了再现像质量。

2 原 理

立体匹配技术^[25-27]是给定同一场景的左图与右图,寻找同一场景点投影到图像中的各像素之间的对应关系,从而得到图像的视差。利用视差图可得到相应的深度图。采用立体匹配技术得到的深度图是以灰度的变化表示 3D 场景深度的变化。可根据深度值的不同,对 3D 物场的二维彩色图像分层。把相同深度值的物点作为同一层的物面信息,即可得到 n 个不同深度值的物面信息。假定每层深度间隔为 δ ,深度图的最大深度值为 d_{\max} ,最小值为 d_{\min} ,则物面总层数为

$$n = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{\delta}, \quad (1)$$

假设最远物面到全息面的距离为 d_0 ,第 i 层物面的深度值为 $i\delta$,则第 i 层物面到全息面距离为 $d_i = d_0 - i\delta$,如图 1 所示。

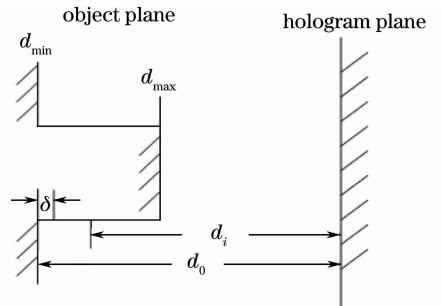


图 1 物面深度值与衍射距离关系图

在得到所有物面到全息面的距离后,可利用层析法^[19]进行全息图计算。层析法计算原理如图 2 所示。

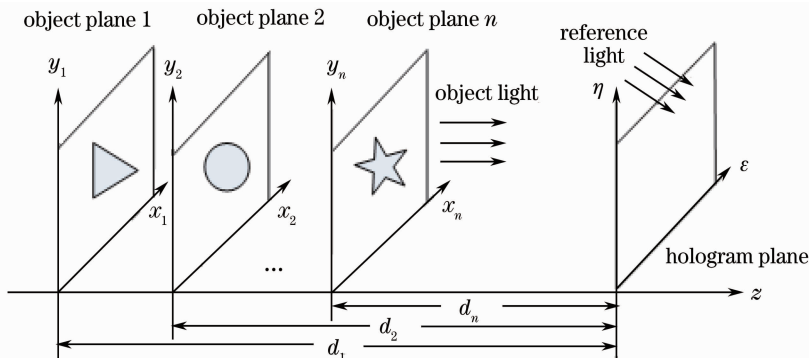


图 2 层析法计算全息原理图

Fig. 2 Schematic diagram of computer generated tomography

采用单步菲涅耳衍射方法(SSF)——傅里叶变换算法^[28]对每层物面进行菲涅耳衍射计算。第*i*层物面对全息图的贡献可表示为

$$H_i(\epsilon, \eta) = \frac{\exp(j2\pi d_i/\lambda)}{j\lambda d_i} \exp\left[\frac{j\pi(\epsilon^2 + \eta^2)}{\lambda d_i}\right] \times \iint \left\{ O_i(x_i, y_i) \exp[j\varphi_i(x_i, y_i)] \exp\left[\frac{j\pi(x_i^2 + y_i^2)}{\lambda d_i}\right] \exp\left(-j2\pi \frac{x_i\epsilon + y_i\eta}{\lambda d_i}\right) \right\} dx dy, \quad (2)$$

式中 (ϵ, η) 表示全息面坐标, (x_i, y_i) 表示第*i*层物面坐标, $\varphi_i(x_i, y_i)$ 表示随机相位因子, 用于降低物波频谱的动态范围。将每层物面对全息图的贡献迭加起来, 整个3D场景的衍射物场可表示为

$$H(\epsilon, \eta) = \sum_{i=1}^n H_i(\epsilon, \eta) = A(\epsilon, \eta) \exp[j\varphi(\epsilon, \eta)], \quad (3)$$

式中 $A(\epsilon, \eta)$ 为全息面物场振幅, $\varphi(\epsilon, \eta)$ 为相位。

为了产生计算全息图, (1)式和(2)式需要被离散化。假设物面和全息面的采样间隔分别为 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 和 $(\Delta \epsilon_i, \Delta \eta_i)$, 物面与全息面的像素点个数为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$, 波长为 λ , 这些参数之间的关系为

$$\Delta x_i = \frac{\lambda d_i}{M \Delta \epsilon_i}, \Delta y_i = \frac{\lambda d_i}{N \Delta \eta_i}. \quad (4)$$

则全息面的离散衍射物场信息可表示为

$$H(m_2, n_2) = \sum_{i=1}^n \frac{\exp(ikd_i)}{i\lambda d_i} \exp\left[\frac{j\pi(m_2^2 + n_2^2)}{\lambda d_i}\right] \times \mathcal{F}\left\{ O_i(m_1, n_1) \exp[j\varphi_i(m_1, n_1)] \exp\left[\frac{i\pi(m_1^2 + n_1^2)}{\lambda d_i}\right] \right\}, \quad (5)$$

$$H(m_2, n_2) = A(m_2, n_2) \exp[j\varphi(m_2, n_2)], \quad (6)$$

式中 m_1, n_1 表示物面的离散坐标值, m_2, n_2 表示全息面的离散坐标值。引入参考光 $R(m_2, n_2) = B(m_2, n_2) \exp[j\phi(m_2, n_2)]$, 采用博奇编码^[29], 将全息面的复振幅信息编码成正的实值透射率函数, 可得到振幅型全息图 H , 如(7)式所示:

$$H = 0.5 \{ 1 + A(m_2, n_2) \cos[\varphi(m_2, n_2) - \phi(m_2, n_2)] \}, \quad (7)$$

式中 $A(m_2, n_2)$ 为归一化衍射物场振幅值, 其取值范围为 $0 \leq A(m_2, n_2) \leq 1$ 。

再现过程中, 把全息图与共轭参考光相乘后, 再利用菲涅耳衍射公式对全息图进行反衍射, 可得到不同距离处的再现像。

3 实验结果

图3为复杂3D场景的二维彩色图像和立体匹配得到的深度图。二维图像与深度图的分辨率均为 $450 \text{ pixel} \times 374 \text{ pixel}$ 。

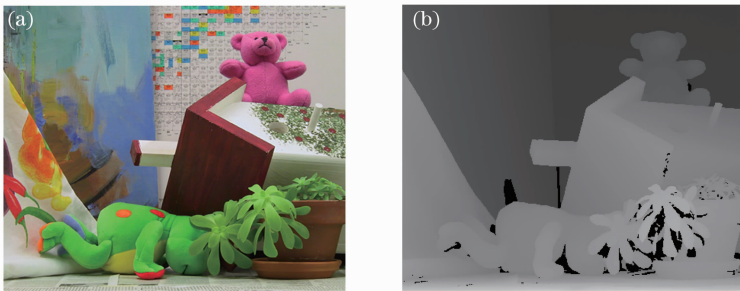


图3 (a)二维彩色图像和(b)深度图

Fig. 3 (a) Color image and (b) depth image

红, 绿, 蓝三个波长分别设为 $\lambda_r = 625 \text{ nm}$, $\lambda_g = 532 \text{ nm}$ 和 $\lambda_b = 473 \text{ nm}$ 。由深度图可得 $d_{\max} = 20.7 \text{ mm}$, $d_{\min} = 0$, 假设3D场景最远处到全息面距离为 $d_0 = 500 \text{ mm}$, 深度间隔为 $\delta = 0.1 \text{ mm}$, 则3D物场被分为208层物面信息。当 $484.4 \text{ mm} \leq d_i \leq$

500 mm 时, 在不同距离处可再现不同的物面信息。图4为 $d_i = 489.6 \text{ mm}$ 处的数值再现像。由于分层太细, 每层的物场信息太少, 在某个距离处再现时聚焦信息太少, 再现效果不理想。



图 4 $d_i=489.6$ mm 处的数值再现像

Fig. 4 Reconstructed image at $d_i=489.6$ mm

为了得到较好的数值再现效果,深度间隔取为 $\delta=5.2$ mm,则整个 3D 物场分成四层物面。深度值

为 $0 \text{ mm} \leq d_{ep} \leq 5.1 \text{ mm}$, $5.2 \text{ mm} \leq d_{ep} \leq 10.3 \text{ mm}$, $10.4 \text{ mm} \leq d_{ep} \leq 15.5 \text{ mm}$, $15.6 \text{ mm} \leq d_{ep} \leq 20.7 \text{ mm}$ 的物点分别作为第一、二、三和四层物面信息,再利用层析法合成全息图。图 5 为 R,G,B 三个颜色通道的博奇编码全息图。

对这些全息图分别进行菲涅耳反衍射,把得到的数值再现像进行合成后,可得到不同距离处的彩色再现像。图 6 为再现距离分别为 $d_1=500$ mm, $d_2=494.8$ mm, $d_3=489.6$ mm 和 $d_4=484.4$ mm 处的再现像。在不同距离处再现了不同的 3D 场景。但是,散斑噪声影响了再现像的质量。

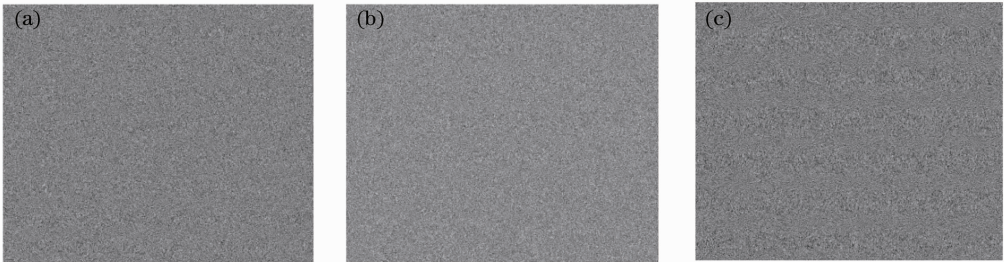


图 5 博奇编码全息图。(a) R 通道; (b) G 通道; (c) B 通道

Fig. 5 Burch coded hologram. (a) R channel; (b) G channel; (c) B channel

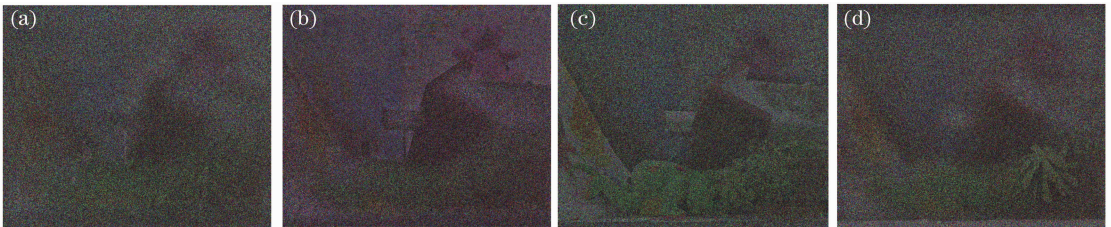


图 6 直接再现像。(a) $d_1=500$ mm; (b) $d_2=494.8$ mm; (c) $d_3=489.6$ mm; (d) $d_4=484.4$ mm

Fig. 6 Directly reconstructed image. (a) $d_1=500$ mm; (b) $d_2=494.8$ mm; (c) $d_3=489.6$ mm; (d) $d_4=484.4$ mm

为了降低散斑噪声,可以采用散射屏或强度叠加改善再现像的质量。由(5)式可以看出随机相位因子 $\varphi_i(x_i, y_i)$ 取不同的值,可得到不同的全息图,把各再现像强度信息进行叠加并归一化作为最终的再现像强度信息。图 7 为强度叠加 80 次后在不同距离处的数值再现像,四个图像分别聚焦在不同的

3D 场景上。在图 7(a)中,距离为 $d_1=500$ mm 处,应再现 3D 场景的最远处物体,但由于深度图把 3D 场景的某些被遮挡部分作为了最远处物体,所以就再现了这些被遮挡部分物体,出现了错误再现现象。这个现象说明了深度图的准确性对 3D 场景全息图的成功生成与再现起着决定性的作用。比较图 6 和

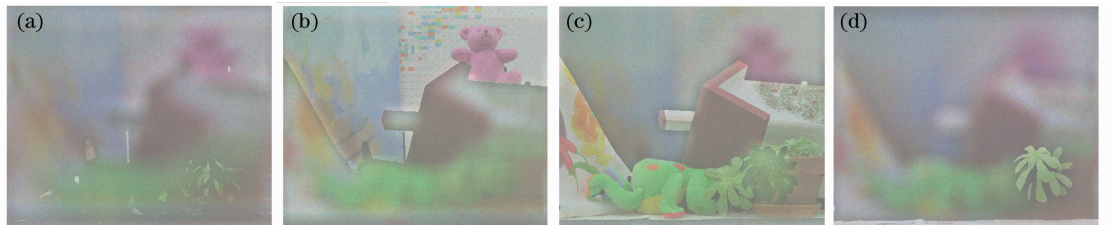


图 7 强度叠加次数为 80 次的不同距离处的再现像。(a) $d_1=500$ mm; (b) $d_2=494.8$ mm; (c) $d_3=489.6$ mm; (d) $d_4=484.4$ mm

Fig. 7 Reconstructed image with the intensity superposition method. (a) $d_1=500$ mm; (b) $d_2=494.8$ mm; (c) $d_3=489.6$ mm; (d) $d_4=484.4$ mm

图 7 可得, 强度叠加法很大程度地减少了散斑对再现像的影响, 提高了再现像质量。

4 结 论

提出了利用复杂 3D 场景的二维彩色图像和立体匹配得到的深度图合成计算菲涅耳全息图的方法。通过把二维彩色图像按深度图分为多层物面信息, 再把每层物面深度值转换为菲涅耳衍射距离。根据层析法原理, 采用单步菲涅耳衍射算法, 即可得到三维场景的计算全息图。仿真结果说明该方法可成功地对复杂彩色三维场景进行全息记录与再现, 且深度图的准确性会直接影响再现像的准确性。此外, 强度叠加法可很大程度地提高再现像质量。

参 考 文 献

- 1 D Gabor. A new microscope principles[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- 2 J W Goodman, R W Lawrence. Digital image formulation from electronically detected holograms[J]. *Appl Phys Lett*, 1967, 11(3): 77-79.
- 3 A W Lohmann, D P Paris. Binary fraunhofer holograms, generated by computer[J]. *Appl Opt*, 1967, 6(10): 1739-1748.
- 4 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.
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 L C Ferri. Visualization of 3D information with digital holography using laser printers[J]. *Computers & Graphics*, 2001, 25(2): 309-321.
- 6 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huajiang. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0612003.
- 7 P Birch, R Young, D Budgett, *et al.*. Computer-generated complex filter for an all optical and a digital-optical hybrid correlator[J]. *Opt Eng*, 2002, 41(1): 105-111.
- 8 Li Junchang, Gui Jinbin, Lou Yuli, *et al.*. Study of creation algorithm of computer-generated hologram of diffuse reflection 3D object[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020903.
李俊昌, 桂进斌, 楼宇丽, 等. 漫反射三维物体计算全息图算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020903.
- 9 A D Stein, *et al.*. Computer-generated holograms; a simplified ray-tracing approach[J]. *Comput Phys*, 1992, 6(4): 389-392.
- 10 M Lucente. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. *J Electron Imaging*, 1993, 2(1): 28-34.
- 11 X J Zhang, X. Liu, X X Chen. Computer-generated holograms for 3D objects using the Fresnel zone plate[C]. *SPIE*, 2005, 5636: 109-115.
- 12 Jhen Si Chen, Quinn Smithwick, Daping Chu. Implementation of shading effect for reconstruction of smooth layer-based 3D holographic images[C]. *SPIE*, 2013, 8648: 86480R.
- 13 Liang Yanming, Zhang Peiqing, Guan Yefeng. Reconstruction and visualization of multi-plane images based onspatial light modulator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 39(10): 1820-1823.
梁艳明, 张培晴, 关烽烽. 基于空间光调制器的多层图像的构建与可视化[J]. *光子学报*, 2010, 39(10): 1820-1823.
- 14 Kim H, Hahn J, Lee B. Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(19): D117-D127.
- 15 Liu Y Z, Dong J W, Pu Y Y, *et al.*. High-speed full analytical holographic computations for true-life scenes[J]. *Opt Express*, 2010, 18(4): 3345-3351.
- 16 N T Shaked, B Katz, *et al.*. Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(34): H120-H136.
- 17 Zheng Huadong, Dai Linmao, Yu Yingjie. Three-dimensional imaging based on orthogonal-stacked lenticular sheets and computer holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(S1): 213-218.
郑华东, 代林茂, 于瀛洁. 基于正交柱透镜光栅的计算全息三维成像[J]. *中国激光*, 2010, 37(S1): 213-218.
- 18 Sun Ping, Xie Jinghui, Zhou Yuanlin, *et al.*. Optical tomography based on Fresnel zone plate scanning holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 110-114.
孙萍, 谢敬辉, 周元林, 等. 基于菲涅耳波带板扫描全息术的光学层析成像[J]. *光学学报*, 2004, 24(1): 110-114.
- 19 S Trester. Computer-simulated Fresnel holography[J]. *Eur J Phys*, 2000, 21(4): 317-331.
- 20 Xie Shiwei, Gao Feng, Zeng Yangsu, *et al.*. Computer-generated hologram of fractional Fourier transform[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(5): 431-434.
谢世伟, 高峰, 曾阳素, 等. 分数傅里叶变换计算全息图[J]. *中国激光*, 2003, 30(5): 431-434.
- 21 A W Lohmann. Image rotation, wigner rotation, and the fractional Fourier transform[J]. *J Opt Soc Am A*, 1993, 10(10): 2181-2186.
- 22 D Leseberg, C Frere. Computer-generated holograms of 3D objects composed of tilted planar segments[J]. *Appl Opt*, 1988, 27(14): 3020-3024.
- 23 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.
- 24 L C Ferri. Visualization of 3D information with digital holography using laser printer[J]. *Computers & Graphic*, 2001, 25(4): 309-321.
- 25 Middlebury. Middlebury Stereo[OL]. <http://vision.middlebury.edu/stereo/>. [2014-3-7].
- 26 Hirschmuller H, Scharstein D. Evaluation of cost functions for stereo matching[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007, 1-8.
- 27 Xu Sheng, Yun Ting, Ye Ning. Research on stereo matching algorithm based on disparity map optimization[J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(2): 658-664.
徐昇, 云挺, 业宁. 基于视差图优化的立体匹配算法研究[J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(2): 658-664.
- 28 J W Goodman. *Introduction to Fourier Optics*[M]. Englewood: Roberts & Co. Publishers, 2005.
- 29 J J Burch. A computer algorithm for the synthesis of spatial frequency filter[J]. *Proc IEEE*, 1967, 55(4): 599-602.

栏目编辑: 何卓铭