

一种基于集成成像生成计算全息图的方法

唐文华¹ 李述利¹ 王君¹ 王琼华^{1,2}

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065; ² 四川大学视觉合成图形图像技术国家重点学科实验室, 四川 成都 610065)

摘要 提出了一种基于集成成像生成三维(3D)物体计算全息图的方法。利用微透镜阵列获取微图像阵列,通过像素提取获得正交投影子图像阵列,根据 3D 中心切片理论,将各正交投影子图像的二维(2D)傅里叶频谱放入相对应的 3D 傅里叶空间中,提取其相交的部分并叠加,可以获得 3D 物体在透镜后焦面的频谱信息分布。计算出在一定传播距离处的菲涅耳衍射分布,用全息编码方法生成菲涅耳计算全息图。进行模拟再现,给出在不同再现距离上获得的再现像,验证了该方法的可行性。该方法能够在非相干照明的情况下采用 3D 傅里叶频谱制作真实 3D 物体的全息图,它减小了系统的复杂程度,在算法实现上更加简单。

关键词 全息; 计算全息图; 三维傅里叶频谱; 正交投影

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209022

A Method of Computer-Generated Hologram Based on Integral Imaging

Tang Wenhua¹ Li Shuli¹ Wang Jun¹ Wang Qionghua^{1,2}

¹ School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China
² National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract A method of computer-generated hologram for the three-dimensional (3D) object based on integral imaging is proposed. The method uses the micro-lens array to form an array of the elemental images and gains an array of the orthographic projection images through pixel extraction. According to the principle of the 3D central slice theorem, a series of the two-dimensional (2D) Fourier spectra of orthographic view images are put in the corresponding 3D Fourier space, and the intersections are extracted and superimposed to obtain the distribution of the 3D object's spectra in the later focal plane of the lens. The distribution of Fresnel diffraction on the specific propagation distance is calculated, and the Fresnel computer-generated hologram is obtained by using holographic encoding method. The numerical reconstruction images of the Fresnel holograms at different distances show that the method is feasible. The method can obtain the hologram of real-existing 3D objects using the 3D Fourier spectrum with regular incoherent illumination. It reduces the complexity of the system, and the algorithm is simpler.

Key words holography; computer-generated hologram; three-dimensional Fourier spectrum; orthographic projection

OCIS codes 090.2870; 090.1705; 090.1760

1 引言

在三维(3D)显示技术中,全息显示技术^[1-4]是一种理想的真 3D 显示技术,它完整记录下真实物体的振幅和相位信息,能在一定条件下再现出与原物完全相同的立体图像,使观看者具有观看真实物体的感觉。在系统的复杂度和加工处理的准备方面,非相干照明全息图的获取^[5]与传统相干照明全

息图的获取相比具有明显的优势。目前,已经有很多方法获取非相干照明全息图,如多视角投影^[6-7]、射线采样^[8]和集成成像^[9]等方法。2004 年 Sando 等^[10]提出白光照明下利用多视角投影图像和 3D 傅里叶旋转抛物面理论合成彩色傅里叶全息图,不过需采用二维(2D)机械扫描机构实现 CCD 在整幅范围内扫描,这导致获得投影图像的过程十分费时和

收稿日期: 2013-10-15; 收到修改稿日期: 2013-12-19

基金项目: 国家 863 计划(2012AA03A301)、四川省科技支撑计划项目(2013GZ0018, 2013GZX0165)

作者简介: 唐文华(1987-),男,硕士研究生,主要从事全息显示技术方面的研究。E-mail: twh502@163.com

导师简介: 王琼华(1969-),女,博士,教授,主要从事 3D 立体显示技术的研究。E-mail: qhwang@scu.edu.cn (通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

复杂。随后,基于集成成像的计算全息也开始成为研究的热点。2008年 Kim 等^[11]通过模拟透镜阵列成像,实现了 3D 物体全息图的制作及再现。2009年 Park 等^[12]采用微透镜阵列正交投影的成像方式制作了菲涅耳全息图和傅里叶全息图。而国内一些学者则在基于微透镜阵列的集成成像^[13-14]、微透镜阵列的制作和成像特性分析^[15-16]等方面开展了大量的研究工作。

本文提出了一种基于集成成像和 3D 傅里叶旋转抛物面理论生成 3D 物体计算全息图的方法。该方法利用微透镜阵列获取微图像阵列,并通过像素提取获得正交投影子图像阵列。根据 3D 中心切片理论^[17],获取 3D 物体在傅里叶平面的频谱信息分布,最后通过全息编码方法获得菲涅耳计算全息图,实现计算全息图的模拟再现。

2 原 理

2.1 微图像阵列和正交投影图像阵列之间的关系

提出的基于集成成像生成 3D 物体计算全息图的方法需获取 3D 物体的正交投影图像阵列,而获取正交投影图像阵列的一种有效方式是基于微透镜阵列获取微图像阵列,并从中提取出所需的正交投影图像阵列^[11]。3D 物体发出的光线经过微透镜阵列以后就会在其后焦面上形成微图像阵列,每个微

透镜的后焦面上对应一个微图像元,提取每个微图像元相同位置处的像素就可以合成一幅正交投影子图像。如图 1 所示,提取用五角星表示的所有像素形成一幅正交投影图像,它包含的像素数等于微图像元的个数,再提取圆点表示的所有像素形成另一幅正交投影图像,经过反复提取就能获得所需的正交投影图像阵列。

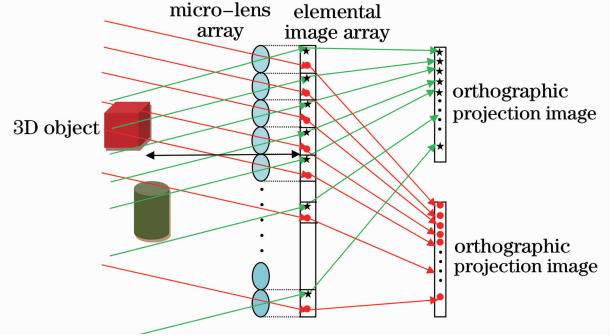


图 1 获取正交投影子图像的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of obtaining orthographic projection images

2.2 3D 傅里叶频谱的提取

根据 3D 中心切片理论可知,3D 物体的傅里叶频谱可以通过物体在不同方位的正交投影图像获得^[10]。对于空间某物体 $o(x, y, z)$,若其位于正透镜的前焦平面上,且透镜主光轴与 z 轴重合,则在透镜后焦平面上的光场分布 $h(x_0, y_0)$ 为

$$h(x_0, y_0) = \iiint o(x, y, z) \exp \left\{ -\frac{i2\pi}{\lambda} \left[\frac{x_0 x + y_0 y}{f} - \frac{z(x_0^2 + y_0^2)}{2f^2} \right] \right\} dx dy dz, \quad (1)$$

式中 λ 和 f 分别是入射光的虚拟波长和透镜的焦距。令 $u = \frac{x_0}{\lambda f}, v = \frac{y_0}{\lambda f}$, (1) 式可变换为

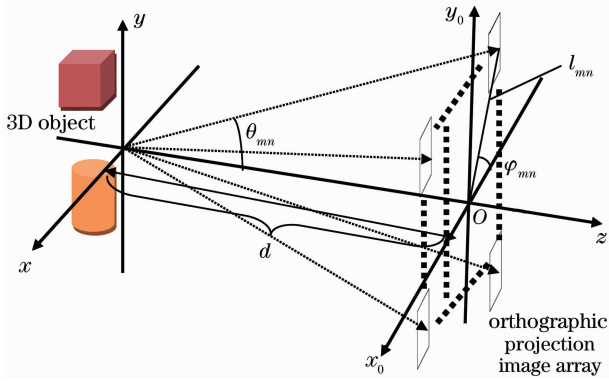
$$h(u, v) = \left\{ \iiint o(x, y, z) \exp[-i2\pi(ux + vy + wz)] dx dy dz \right\} \Big|_{w=-\lambda(u^2+v^2)/2} = \mathcal{F}_3[o(x, y, z)] \Big|_{w=-\lambda(u^2+v^2)/2}, \quad (2)$$

式中 $\mathcal{F}_3[\cdot]$ 代表 3D 傅里叶变换, $w = -\lambda(u^2 + v^2)/2$ 代表一个旋转抛物面,由此可以得出在透镜后焦面也就是傅里叶平面上的光场分布与 3D 傅里叶频谱在旋转抛物面上的部分是等价的。根据 3D 中心切片理论, (2) 式又可以写为

$$h(u, v) = \sum \left\{ \mathcal{F}_2[p_{mm}(x_0, y_0)] \Big|_{w=-\lambda(u^2+v^2)/2} \right\}, \quad (3)$$

式中 p_{mm} 表示正交投影子图像, $\mathcal{F}_2[\cdot]$ 表示 2D 傅里叶变换, m 表示正交投影图像阵列的行数, n 表示正交投影图像阵列的列数。由 (3) 式可以得出傅里叶平面上的光场分布通过将获取的各个方向的正交投影图像作 2D 傅里叶变换,并在相对应的 3D 傅里叶空间中与旋转抛物面相交,提取相交部分并叠加

即可得到 3D 物体的傅里叶频谱。每幅正交投影子图像都对应着一个特定的正切角 θ_{mm} 和方位角 φ_{mm} , 如图 2 所示。其中 o 点为正交投影图像阵列的中心, $\tan \theta_{mm} = l_{mm}/d, d$ 为 z 轴上 3D 物体中心与正交投影图像阵列中心 o 点之间的距离, l_{mm} 为各正交投影子图像中心到 o 点的距离。对正交投影子图像 p_{mm} 作 2D 傅里叶变换,在 3D 傅里叶空间坐标 (u, v, w) 中

图2 方位角 φ_{nm} 和正切角 θ_{nm} 的定义Fig. 2 Definition of azimuth φ_{nm} and tangent angle θ_{nm}

与旋转抛物面相交,为

$$w \cos \theta_{nm} + u \sin \theta_{nm} = 0, \quad (4)$$

$$w = -\frac{\lambda}{2}(u^2 + v^2). \quad (5)$$

联立(4)~(5)式并化简,可得所需提取的频谱信息分布为

$$\left(u - \frac{\tan \theta_{nm}}{\lambda}\right)^2 + v^2 = \left(\frac{\tan \theta_{nm}}{\lambda}\right)^2. \quad (6)$$

由(6)式可知该频谱在 $u-v$ 面上表示出来是一个半径为 $\tan \theta_{nm} / \lambda$ 的圆,圆心位置由 $\tan \theta_{nm} / \lambda$ 和方位角 φ_{nm} 决定。根据对称性原理可知,关于正交投影图像阵列中心对称的四幅正交投影图像有相同的正切角,也就是具有相同长度的 l_{nm} ,假设正交投影图像阵列的行数和列数相等即 $m = n$,以正交投影图像 p_{11} 为例,则与 p_{11} 对称的正交投影图像如图3所示,由图可知它们的方位角的关系为

$$\varphi_{1n} = 180^\circ - \varphi_{11}, \quad (7)$$

$$\varphi_{n1} = 360^\circ - \varphi_{11}, \quad (8)$$

$$\varphi_{m1} = 180^\circ + \varphi_{11}. \quad (9)$$

又因为 $l_{11} = l_{1n} = l_{n1} = l_{m1} = l_{nm}$, $\tan \theta_{nm} = l_{nm} / d$,可以得到 $\tan \theta_{11} / \lambda = \tan \theta_{1n} / \lambda = \tan \theta_{n1} / \lambda = \tan \theta_{m1} / \lambda$ 。结合(7)~(9)式,在提取3D物体的傅里叶频谱时可以

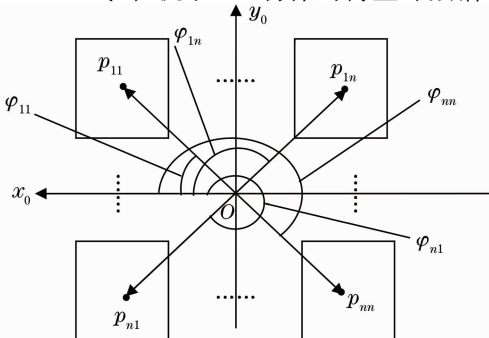


图3 正交投影图像阵列的对称性

Fig. 3 Symmetry of array of orthographic projection images

利用对称性快速提取出它们相应的频谱信息,如图4所示,四个圆的半径相同,每个圆心位置则与各自不同的方位角 φ_{nm} 相关。然后依次将所有正交投影图像进行上述处理,就可以得到3D场景在傅里叶平面上的频谱信息分布,最后计算出其在一定传播距离处的菲涅耳衍射分布,用计算全息编码方法生成菲涅耳计算全息图。

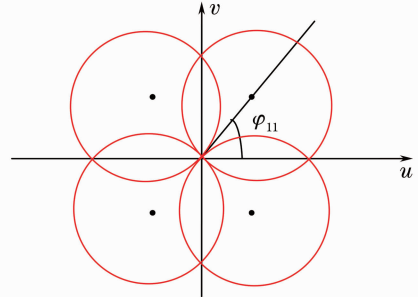
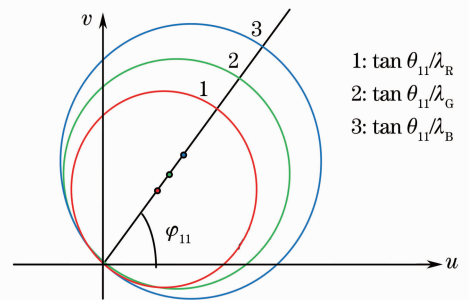


图4 从四幅对称的正交投影图像提取的3D频谱

Fig. 4 Extract 3D spectrum from four symmetrical orthographic projection images

为了获得彩色频谱信息分布,采用三基色光源分别照射物体并提取对应的频谱信息。三基色光源的波长分别为 $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$,由(6)式可知,从正交投影图像 p_{11} 提取的圆的半径为 $\tan \theta_{11} / \lambda$,因为记录光波长不同,对应的圆半径分别为 $\tan \theta_{11} / \lambda_R, \tan \theta_{11} / \lambda_G$ 和 $\tan \theta_{11} / \lambda_B$,圆心的位置也按照 $(\tan \theta_{11} / \lambda_R, \varphi_{11}), (\tan \theta_{11} / \lambda_G, \varphi_{11})$ 和 $(\tan \theta_{11} / \lambda_B, \varphi_{11})$ 改变,如图5所示。

图5 从 p_{11} 提取的彩色频谱Fig. 5 Color spectrum of extraction from p_{11}

3 实验

实验采用3ds Max软件建立3D场景,该3D场景由两个处于不同深度的正方体组成,为便于区分,在两个正方体的前平面上分别贴上“川”和“大”两个汉字,这两个正方体前表面距坐标中心的距离分别为 $z = -3.9 \text{ mm}$ 和 $z = 3.9 \text{ mm}$,如图6所示。为了保证全息图再现的质量必须获取足够的3D场景信息,如果正交投影图像的数目太少,重建的像质将不

理想。但是如果合成所需的投影像数量高达上千幅,不仅增大了计算量,而且对大量投影像进行抽样容易造成信息重叠产生噪声,不利于改善像质。综合考虑,将虚拟相机个数设置为 256×256 ,通过虚拟相机获取微图像阵列,每幅微图像的像素数为 $16 \text{ pixel} \times 16 \text{ pixel}$,如图 7 所示。通过提取微图像阵列,将微图像阵列转换为正交投影图像阵列,如图 8 所示,获得的正交投影图像数目为 16×16 ,每幅正交投影图像的像素数为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。

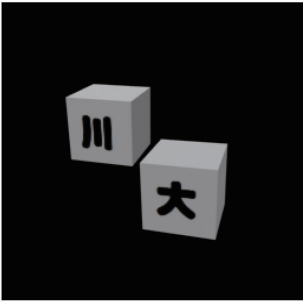


图 6 3D 场景
Fig. 6 3D scene

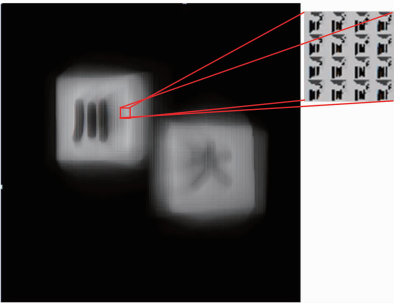


图 7 微图像阵列
Fig. 7 Array of elemental images

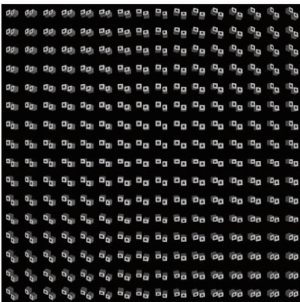


图 8 正交投影图像阵列
Fig. 8 Array of the orthographic projection images

将图像数据导入程序中,设置在 z 轴上 3D 场景中心到虚拟相机阵列的距离 $d=450 \text{ mm}$,对获取的每幅正交投影图像进行 2D 傅里叶变换,并分别提取其相应的频谱信息来填充 $u-v$ 平面,最终得到抽样结果,如图 9 所示。最后根据菲涅耳衍射原理,

采用傅里叶变换法计算出在一定传播距离处的菲涅耳衍射分布,利用博奇编码方法制得菲涅耳计算全息图。由于计算全息图再现时存在零级衍射像、共轭像和原始像,采用窗口滤波函数对全息图的频谱进行滤波操作,滤掉不需要的频谱分量,仅保留所需的原始像的频谱,再对全息图进行计算机模拟再现得到在不同再现距离处的再现效果,在再现距离为 $z=350 \text{ mm}$ 处,带有“川”字的正方体聚焦,如图 10(a) 所示。而在再现距离为 $z=480 \text{ mm}$ 处,带有“大”字的正方体聚焦,如图 10(b) 所示,因此可证明该数字再现的场景具有深度信息,实现了 3D 重建。

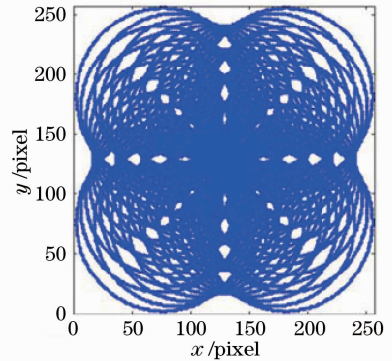


图 9 提取的抽样结果
Fig. 9 Sampling results of extraction

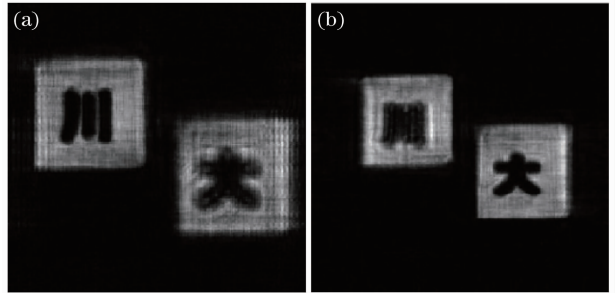


图 10 再现距离不同时的数值再现结果。(a) $z=350 \text{ mm}$;
(b) $z=480 \text{ mm}$
Fig. 10 Numerical reconstructed images at (a) $z=350 \text{ mm}$ and (b) $z=480 \text{ mm}$

对于彩色 3D 图像如图 11 所示,在两个不同颜

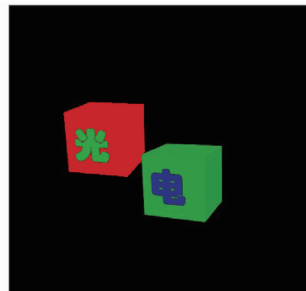


图 11 彩色 3D 场景
Fig. 11 Color 3D scene

色的正方体的前平面上分别贴上不同颜色的“光”和“电”两个汉字,采用三基色光源照明进行模拟再现,在再现距离为 $z=350$ mm 处,带有“光”字的正方体聚焦,如图 12(a)所示。而在再现距离为 $z=480$ mm 处,带有“电”字的正方体聚焦,如图 12(b)所示。

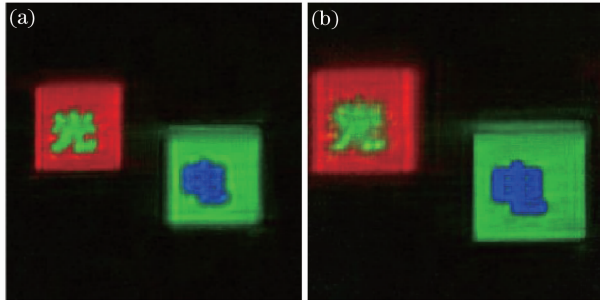


图 12 再现距离不同时的数值再现结果。(a) $z=350$ mm;
(b) $z=480$ mm

Fig. 12 Numerical reconstructed images at (a) $z=350$ mm
and (b) $z=480$ mm

4 结 论

提出了一种基于集成成像生成 3D 物体计算全息图的新方法。利用该方法对 3D 物体的傅里叶频谱的获取进行了分析,结合 3D 中心切片理论和正交投影图像阵列提取 3D 傅里叶频谱信息,并计算出在一定传播距离处的菲涅耳衍射分布,利用全息编码获得菲涅耳计算全息图并进行了模拟再现,结果表明该方法可以实现 3D 物体的成像。该方法减小了系统的复杂程度,在算法实现上更加简单,有利于改善再现像的质量,为下一步 3D 物体计算全息图的动态显示提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Liu Yuanzhi, Pang Xiaoning, Jiang Shaoji, *et al.*. Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling[J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 12068–12076.
- 2 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng, *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0309001.
沈川,张成,刘凯峰,等.基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J].*光学学报*, 2012, 32(3): 0309001.
- 3 Chen Jiazhen, Zheng Zihua, Lian Guiren. Method on computer-generated hologram coding and digital reconstruction of multi-object waves[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s2): s209009.

- 4 陈家祯,郑子华,连桂仁.多物波计算全息编码与数字再现方法[J].*中国激光*, 2012, 39(s2): s209009.
- 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,王滔天,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 Liu Yingchen, Fan Jinping, Zeng Fanchuang, *et al.*. Recording, reconstruction and realization of white-light Fresnel incoherent digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1009002.
刘英臣,范金坪,曾凡创,等.白光菲涅耳非相干数字全息的记录、再现及实现[J].*中国激光*, 2013, 40(10): 1009002.
- 6 Natan T Shaked, Joseph Rosen. Modified Fresnel computer-generated hologram directly recorded by multiple-viewpoint projections[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(19): D21–D27.
- 7 Natan T Shaked, Barak Katz, Joseph Rosen. Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(34): H120–H136.
- 8 Koki Wakunami, Masahiro Yamaguchi. Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane[J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9086–9101.
- 9 Kyongsik Choi, Joohwan Kim, Yongjun Lim, *et al.*. Full parallax viewing-angle enhanced computer-generated holographic 3D display system using integral lens array[J]. *Opt Express*, 2005, 13(26): 10494–10502.
- 10 Yusuke Sando, Masahide Itoh, Toyohiko Yatagai. Full-color computer-generated holograms using 3-D Fourier spectra[J]. *Opt Express*, 2004, 12(25): 6246–6251.
- 11 Min-Su Kim, Ganbat Baasantseren, Nam Kim, *et al.*. Hologram generation of 3D objects using multiple orthographic view images[J]. *J Opt Soc Korea*, 2008, 12(4): 269–274.
- 12 Jae-Hyeung Park, Min-Su Kim, Ganbat Baasantseren, *et al.*. Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images[J]. *Opt Express*, 2009, 17(8): 6320–6334.
- 13 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.
- 14 Chao-Chao Ji, Cheng-Gao Luo, Huan Deng, *et al.*. Tilted elemental image array generation method for moiré-reduced computer generated integral imaging display[J]. *Opt Express*, 2013, 21(17): 19816–19824.
- 15 Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2869–2872.
王伟,周常河.一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术[J].*中国激光*, 2009, 36(11): 2869–2872.
- 16 Liu Desen, Hu Jianming, Liu Wei, *et al.*. Studies on the optical properties of planar intersect microlens arrays[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(6): 743–748.
刘德森,胡建明,刘炜,等.平面交叉型微透镜阵列的制作及成像特性研究[J].*中国激光*, 2005, 32(6): 743–748.
- 17 Ming-Yee Chiu, Harrison H Barrett, Robert G Simpson. Three-dimensional reconstruction from planar projections[J]. *J Opt Soc Am*, 1980, 70(7): 755–762.