

计算集成平板周视彩色全息图

李志光 吴琼 王辉 毋东元

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要 提出计算机和光学联合制作平板周视全息的方法,通过计算得到集成菲涅耳环带全息图,利用环带全息图的再现像作为记录目标进行光学全息的拍摄,实现集成平板周视彩色全息图。详细分析了集成平板周视彩色全息原理,通过实验进行了验证。该方法增强了体视全息显示的灵活性,提高了平板周视彩色全息图的计算速度。

关键词 全息; 平板周视彩色全息; 计算机全息图; 集成全息

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1109003

Computer Integrated Circular-Viewing Plane Color Hologram

Li Zhiguang Wu Qiong Wang Hui Wu Dongyuan

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract The method of combining computer with optical holography to manufacture circular-viewing plane hologram is proposed. An integrated Fresnel ring hologram is first obtained by computer generated holography. Then the reconstruction image of the ring hologram is chosen as the target for recording optical hologram, and finally the integrated circular-viewing plane color hologram is obtained. The principle of integrated circular-viewing plane color hologram is analyzed in detail, and verified by experiment. This technology enhances the display flexibility of stereoholography; the computation speed of the circular-viewing plane color hologram is also improved.

Key words holography; circular-viewing plane color hologram; computer generated hologram; integrated hologram

OCIS codes 090.1705; 090.1760; 090.2870; 090.4220

1 引言

周视全息图(CVH)可以显示物体 360° 视角的像。实现周视全息显示的技术有平面、柱面和锥面等多种方式。光学平面周视全息图(CVPH)可以通过光学彩虹全息技术获得^[1],柱面或锥面全息图是利用多重全息技术,将三维(3D)物体各个视角的二维平面图像的全息图拼接到一个柱面或锥面上^[2-3]。计算机全息是三维显示技术重要的发展方向^[4],利用计算全息技术也可以获得柱面或锥面全息图^[5-6],优点是提高了显示物体的灵活性,即不仅可以显示实际物体,也可以显示虚拟三维物体。相对于锥面或者柱面全息图,平板周视全息显示具有显示装置占据空间小,三维显示的空间效果强烈

等优点。Cheng等^[7]提出“光盘式”像面多重全息技术,克服了柱面或锥面多重全息的缺点,得到了很好的平板周视三维显示,但因为是采用全光学全息的方法,制作技术比较复杂。本课题组研究利用逐点算法获得实现平板周视全息显示^[8],计算量比较大。近年来人们提出多平面计算全息三维显示的算法,可以大大提高计算速度^[9-10]。本文结合周视全息和多平面计算全息原理,提出集成周视计算全息的技术,将计算全息和光学全息相结合获得平面多重周视全息图,不仅简化了周视全息图的算法,提高了计算速度,对于周视全息的电子显示^[11]和动态实时显示^[12]具有实用意义。

收稿日期: 2014-05-04; **收到修改稿日期**: 2014-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(11374267)

作者简介: 李志光(1988—),男,硕士研究生,主要从事计算全息与三维显示、微纳米光刻技术等方面的研究。

E-mail: 315432530@qq.com

导师简介: 王辉(1958—),男,博士,教授,主要从事光信息处理、全息三维显示、微光学元件设计等方面的研究。

E-mail: wh@zjnu.cn (通信联系人)

2 环形周视全息图的计算

图 1 是平板周视全息图再现像原理,从全息图出射的物光在距离 z_e 处形成一个环形光带,观察者可以围绕环形光带看到物体一周的像。两只眼睛是通过环形光带的不同区域看物体的,如图 1 中 a 和 b 处发出的光在左右眼分别形成了左右眼视图,从

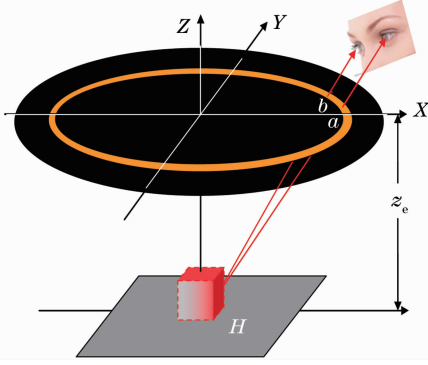


图 1 平板周视全息图再现像原理图
Fig. 1 Reconstruction of the CVPH

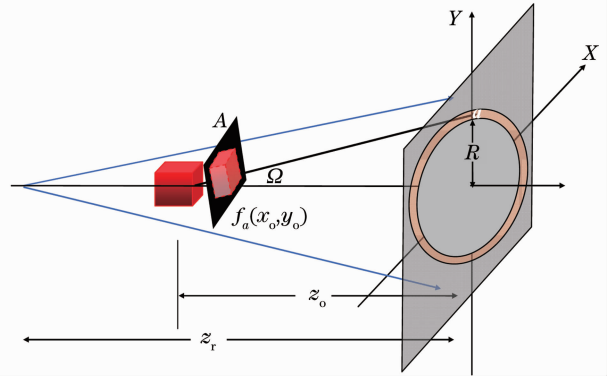


图 2 环形体视全息图计算原理图

Fig. 2 Calculation principle of ring stereo-hologram 而可以产生立体感觉。

环形光带不同区域携带有物体不同视角的视图,或者说物体一周的视图均匀分布在环形光斑的一周之中。可以利用图 2 光路来讨论环带形全息图的计算原理。设 a 处所能看到的物体视图二维分布为 $f_a(x_0, y_0)$, 其在 a 处附近的菲涅耳衍射分布为

$$U_o(x, y) = \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2}{2z_o}\right) \iint f_a(x_0, y_0) \exp\left(-ik \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_o}\right) \exp\left(ik \frac{x_0 x + y_0 y}{z_o}\right) dx_0 dy_0 = \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2}{2z_o}\right) \mathcal{F}\left[f_a(x_0, y_0) \exp\left(-ik \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_o}\right)\right] = \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2}{2z_o}\right) \mathcal{U}_o(x, y) = |\mathcal{U}_o(x, y)| \exp\left[\varphi_{o_a}(x, y) - ik \frac{x^2 + y^2}{2z_o}\right] = |\mathcal{U}_o(x, y)| \exp[\varphi_o(x, y)], \quad (1)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, λ_0 是计算全息图所取的波长。 \mathcal{F} 表示傅里叶变换。 $\mathcal{U}_o(x, y) = \mathcal{F}\left[f_a(x_0, y_0) \exp\left(-ik \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_o}\right)\right]$, $|\mathcal{U}_o(x, y)|$ 是 $\mathcal{U}_o(x, y)$ 的模, $\varphi_{o_a}(x, y)$ 是 $\mathcal{U}_o(x, y)$ 的幅角。(1) 式表明,对于某一视角的全息图,可以利用快速傅里叶变换进行计算,这样就大大提高了计算速度。设参考光波为 $U_r(x, y) = a_r \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2}{2z_r}\right)$, 采用博奇型编码方法计算全息图,得全息图透射率分布为

$$\tau(x, y) = \tau_0 + 2a_r |\mathcal{U}_o(x, y)| \cos[\varphi_r(x, y) - \varphi_o(x, y)], \quad (2)$$

τ_0 是一个偏值常数, $\varphi_r(x, y) = k \frac{x^2 + y^2}{2z_r}$ 是参考光的相位。

2.1 全息图视角问题

周视全息图的三维效果与其侧视角 Ω 有关,可以从图 2 容易获得侧视角 Ω 为

$$\tan \Omega = R/z_o, \quad (3)$$

R 是环形光带的半径。如果计算全息图时参考光设置平行于光轴的平行光,则 Ω 实际上是参物夹角,与之对应的全息图空间频率为

$$f = \sin \Omega / \lambda_0. \quad (4)$$

设计算全息图抽样间隔为 d_h , 则按抽样定理,全息图最大空间频率为 $f_c = 1/(2d_h)$, 因此周视全息图的最大侧视角为

$$\sin \Omega_{\max} = \lambda_0 f_c = \lambda_0 / (2d_h), \quad (5)$$

进一步,可以计算出环形光带(全息图)的半径为

$$R = z_o \tan \Omega_{\max} = z_o \frac{\sin \Omega_{\max}}{\sqrt{1 - \sin^2 \Omega_{\max}}} = \frac{\lambda_0 z_o}{\sqrt{4d_h^2 - \lambda_0^2}}. \quad (6)$$

2.2 彩色物体环形全息图

根据全息图物像关系,当记录光和再现光一致,并且都为平行光时,全息图再现的实像坐标为^[13]

$$z_i = -\frac{z_o}{\mu}, \quad x_i = x_o, \quad y_i = y_o, \quad (7)$$

式中 $\mu = \lambda_c / \lambda_0$ 。两步法计算集成平板周视全息图原理是,首先通过计算获得环形全息图,然后利用光学方法拍摄平板周视全息图。将环形全息图 H_r 置于图 3 所示光路中,用计算全息图时的参考光共轭光再现,得到物体的实像,这个实像就是第二步光学全息制作时的“物体”。在实像附近放置全息干板,引入参考光记录实像全息图,即可以得到需要的平板周视全息图。

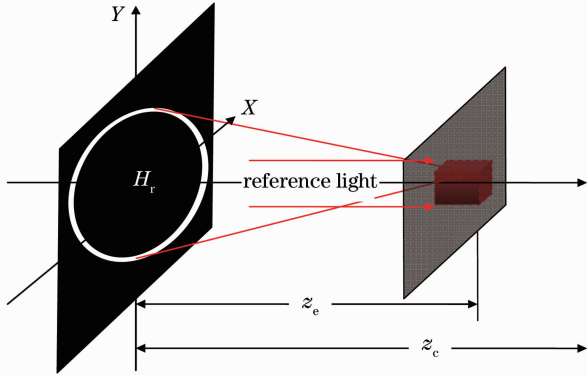


图 3 光学方法拍摄平板周视全息图的部分光路图

Fig. 3 Recording circular-viewing plane hologram by optical method

根据色度学原理,彩色物体环形全息图可以通过计算物体三个原色全息图获得。首先将彩色物体数据分解成为三原色数据,设在某视角处三原色视图分布分别为 $f_{rR}(x_0, y_0)$ 、 $f_{gR}(x_0, y_0)$ 、 $f_{bR}(x_0, y_0)$, 利用(1)式分别计算物光波分布 $U_{oR}(x, y)$ 、 $U_{oG}(x, y)$ 、 $U_{oB}(x, y)$, 再利用(2)式计算出三个全息图透射率 $\tau_R(x, y)$ 、 $\tau_G(x, y)$ 、 $\tau_B(x, y)$ 。注意(1)、(2)式中计算时的波数 k 必须与所选取的三原色波长 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 一致。

在第二步记录光学全息图时,理论上必须利用计算波长 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 三色激光才能再现出原彩色物体的像,并且必须用同样三个波长的光束作为参考光记录其彩色全息图。显然这样的拍摄不仅对于设备要求高,光路复杂,而且不利于光刻胶制版进行模压复制,因为一般光刻胶仅仅对蓝光敏感,因此提出利用单波长激光拍摄彩色周视全息图。

设一个彩色物点 (x_0, y_0, z_0) 被分成三原色点后,其坐标分别用 (x_{or}, y_{or}, z_{or}) 、 (x_{og}, y_{og}, z_{og}) 、 (x_{ob}, y_{ob}, z_{ob}) 表示,用单色光 λ_c 再现全息图,并设 $\lambda_c = \lambda_r$, 则根据(7)式三个原色全息图再现像点坐标分别为

$$\begin{aligned} x_{iR} &= x_{or}, y_{iR} = y_{or}, z_{iR} = -z_{or}, \\ x_{iG} &= x_{og}, y_{iG} = y_{og}, z_{iG} = -\frac{z_{og}}{\mu_g} = -\frac{\lambda_g}{\lambda_r} z_{og}, \\ x_{iB} &= x_{ob}, y_{iB} = y_{ob}, z_{iB} = -\frac{z_{ob}}{\mu_b} = -\frac{\lambda_b}{\lambda_r} z_{ob}, \end{aligned} \quad (8)$$

因为 $x_{or} = x_{og} = x_{ob}, y_{or} = y_{og} = y_{ob}, z_{or} = z_{og} = z_{ob}$, (8)式说明,当用单色光照明环形全息图时,三原色像纵向不重合,但在横向放大率相同。图 4 给出了三个原色像的位置示意图。为了使得三个像点重合,可以移动绿原色和蓝原色环形全息图,使它们与红原色环形全息图的相距依次为

$$\begin{aligned} \Delta_{Hgr} &= z_{or} - \frac{\lambda_g}{\lambda_r} z_{or} = \left(1 - \frac{\lambda_g}{\lambda_r}\right) z_{or}, \\ \Delta_{Hbr} &= z_{or} - \frac{\lambda_b}{\lambda_r} z_{or} = \left(1 - \frac{\lambda_b}{\lambda_r}\right) z_{or}. \end{aligned} \quad (9)$$

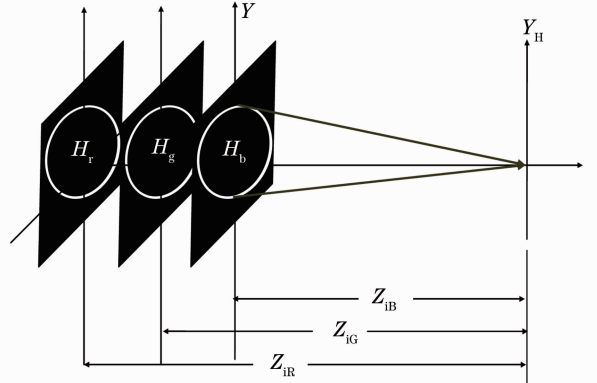


图 4 三原色像重合时,环形全息图的位置

Fig. 4 Location of ring-holograms for the three-primary color images coinciding

图 4 是使三原色像重合环形全息图的相对位置,显然由于全息图之间的相互遮挡,是无法得到最终合成像的。如果在计算环形全息图时,将红绿蓝三个原色环形全息图计算在同一个平面上 H_r, H_g 和 H_b 处时,其衍射成像效果是和图 4 是一致的。为了达到这样的目的,计算环形全息图时,必须对物体的绿原色和蓝原色视图坐标进行如下变换:

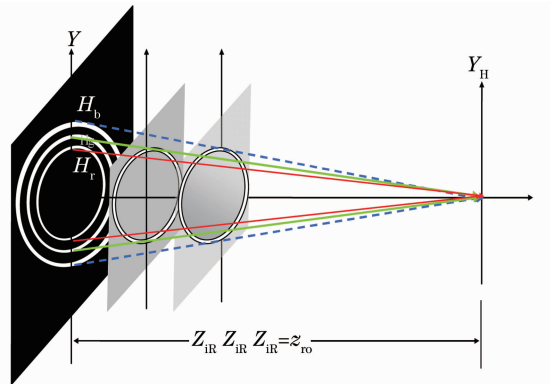


图 5 与三原色像对应的环形全息图在同一平面

Fig. 5 Three ring holograms corresponding three-primary images in the same plane

$$z_{og} = \frac{\lambda_r}{\lambda_g} z_{or} = \mu_g z_{or}, z_{ob} = \frac{\lambda_r}{\lambda_b} z_{or} = \mu_b z_{or}, \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式,就得到环形全息图再现的三个像点纵向坐标分别为

$$\begin{aligned} z_{iR} &= -z_{or}, \\ z_{iG} &= -z_{og}/\mu_g = -z_{or}, \\ z_{iB} &= -z_{ob}/\mu_b = -z_{or}, \end{aligned} \quad (11)$$

说明此时三个原色像是重合的。另外,由图 5 的几何关系可以推导出,此时三个环形全息图的半径分别为

$$R_g = R_r, \quad R_g = \frac{\lambda_r}{\lambda_g} R_r, \quad R_b = \frac{\lambda_r}{\lambda_b} R_r. \quad (12)$$

3 实验验证和讨论

实验采用物体是三维数字建模的人像,如图 6(a)。根据三原色环形全息图的计算原理获得全息图,然后利用自行研制的高分辨图像直写系统输出全息图,输出系统的分辨率为 $d_h = 570 \text{ nm}$ 。计算三原色波长分别为 $\lambda_r = 632.8 \text{ nm}$, $\lambda_g = 540 \text{ nm}$, $\lambda_b = 460 \text{ nm}$ 。以最短波长 $\lambda_b = 460 \text{ nm}$ 计算最大侧视角,由(5)式可以

得到 $\Omega_{\max} \approx 23^\circ$ 。

计算菲涅耳环形全息图时,衍射距离的设置必须考虑第二步光学全息图拍摄时留有足够的空间设置光路。实验中选取 $z_{or} = 50 \text{ mm}$,根据(6)式和(12)式,与三原色物体相对应的三个环形全息图的半径分别为: $R_b = 45.9 \text{ mm}$, $R_g = 39 \text{ mm}$ 和 $R_r = 33.4 \text{ mm}$ 。人眼瞳孔直径约为 3 mm ,如果最后观察距离为 500 mm ,则对应的视角约为 $3/500 = 0.006 \text{ rad}$ 。为了使得提取的体视图尽量与人眼瞳孔匹配并保证立体视觉的连续性,将环形全息图等分成 1024 个分区($2\pi/0.006$),每一个分区全息图对应一个视图,如图 6(b)~(d)所示。

图 7 是光学全息图拍摄光路,实验中光源是 He-Ne 激光,波长为 632.8 nm ,与环形全息图红原色计算波长一致。将制作好的环形全息图置于光路中,激光束经分束器(BS1)分成两束,一束经反射镜(M1)反射后扩束并准直照明环形全息图,另一束经扩束准直后由反射镜(M2)和分束器(BS2)反射作为参考光。采用天津 I 型全息干板作为记录材料,干版置于环形全息图再现像附近。

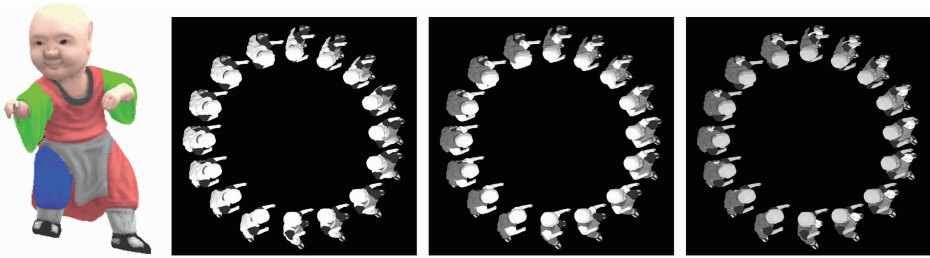


图 6 三维物体(a)及环形全息图各个位置对应的视图示意图,(b),(c),(d)分别对应红绿蓝三原色视图
Fig. 6 3D object recorded and views. (b), (c), (d) corresponding to the three-primary color views respectively

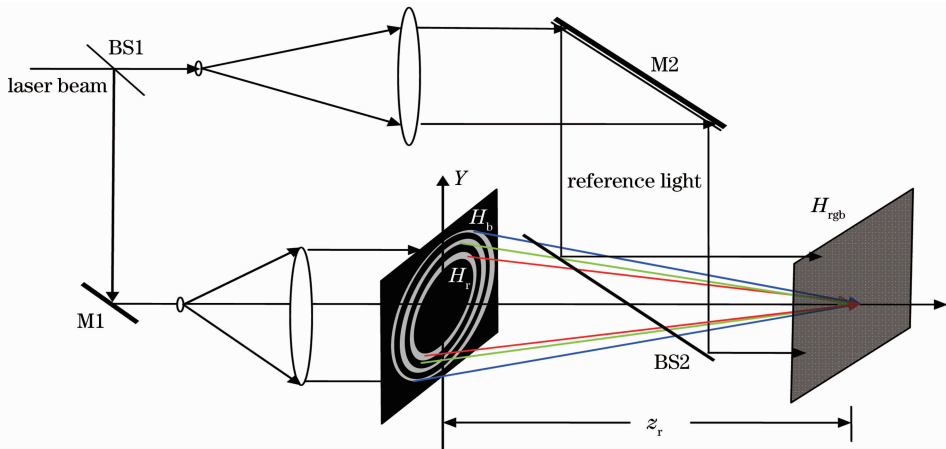


图 7 光学平面周视全息图拍摄光路
Fig. 7 Optical setup for recording CVPH

图 8 是再现装置,将周视全息图放置于 W 处,当眼睛处于适当的环形区域,即可周视观察到彩色

再现像。图 9 给出了用针孔相机拍摄的周视全息图不同角度的再现像。

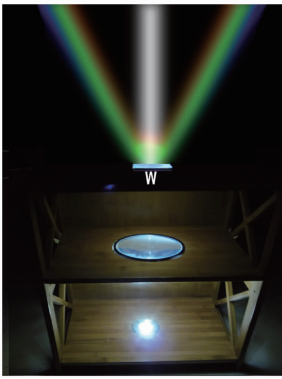


图8 周视全息图再现装置

Fig. 8 Reconstruction setup for CVPH

由(5)式可知,环形全息图的抽样间隔 d_h 决定其侧视角 Ω ,抽样间隔 d_h 越小,侧视角 Ω 就越大,三维显示效果就越明显。目前实验中所用的全息图缩微输出装置的能够分辨的全息图像素间隔 $d_h = 570 \text{ nm}$,对于波长 $\lambda_h = 460 \text{ nm}$,对应的侧视角约为 23° ,实际观测时与计算是一致的,但这样的角度对于平板周视全息而言还显得比较小,观察效果还不太理想。另外,作为体视集成全息,往往会产生所谓的“栅栏效应”,即随着眼睛的移动,将出现像的闪烁现象。体视图选择的越多,“栅栏效应”越不明显,理论和实验都证明,当以一个瞳孔区域所对应的视角作为单位选择视图数目时,人眼基本上觉察不到“栅栏效应”^[14]。

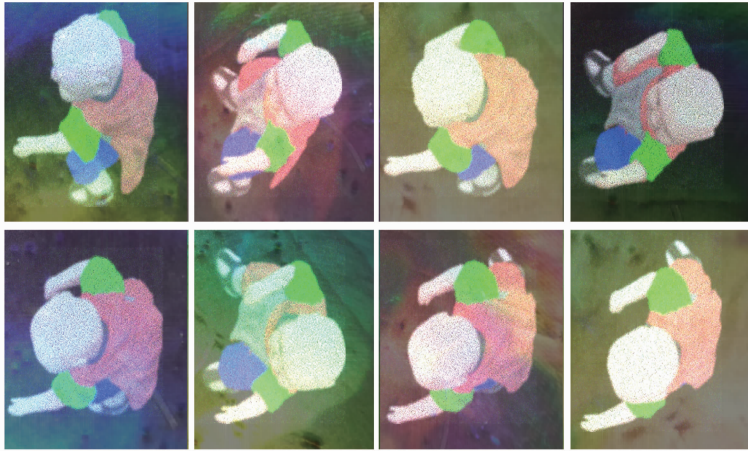


图9 周视全息图不同角度再现像(针孔相机拍摄)

Fig. 9 Reconstruction images of different visual angles

4 结 论

与传统的光学周视全息图相比,本文提出的计算集成平板周视彩色全息技术,计算简单,方便灵活,待显示的目标既可以是实际物体,也可以是虚拟物体,初步实验完全证明了技术的可行性。进一步的工作是提高计环形周视全息图出图的分辨率,增加侧视角,以得到更加理想的平板周视彩色三维显示效果。

参 考 文 献

- 1 Wang Dianmin, Ha Liuzhu, Wang Mincao. Circular-viewing rainbow holography [J]. Acta Optica Sinica, 1990, 10(11): 996-998.
王典民,哈流柱,王民草. 周视彩虹全息术[J]. 光学学报,1990, 10(11), 996-998.
- 2 Okada K, Yoshii S, Yamaji Y, *et al.*. Conical holographic stereograms[J]. Opt Commun, 1989, 73(5): 347-350.
- 3 Murillo-Mora L M, Okada K, Honda T, *et al.*. Color conical holographic stereogram[J]. Opt Eng, 1995, 34(3): 814-818.
- 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 Sando Y, Itoh M, Yatagai T. Fast calculation method for cylindrical computer-generated holograms [J]. Opt Express, 2005, 13(5): 1418-1423.

6 Yamaguchi T, Fujii T, Yoshikawa H. Fast calculation method for computer-generated cylindrical holograms [J]. Appl Opt, 2008, 47(19): D63-D70.

7 Cheng Y S, Chen Z F, Chen C H. Virtual-image generation in 360-degree viewable image-plane disk-type multiplex holography [J]. Opt Express, 2013, 21(8): 10301-10313.

8 Wu Dongyuan, Wang Hui, Xie Yutao, *et al.*. Circular-viewing hologram with large side viewing angle generated by combining computer with optical method[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(12): 1454-1459.

毋东元,王辉,谢裕涛,等. 计算机与光学全息术结合制作大侧视角周视全息图[J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1454-1459.

9 Wakunami K, Yamaguchi M. Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane [J]. Opt Express, 2011, 19(10): 9086-9101.

10 Li Fang, Bi Yong, Wang Hao, *et al.*. Weighted 3D GS algorithm for image-quality improvement of multi-plane holographic display [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1009001.

11 Wang Hao, Bi Yong, Li Fang, *et al.*. Enlargement technology of reconstructed image of computer generated hologram based on

- spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0309001.
- 王 皓, 毕 勇, 李 芳, 等. 基于空间光调制器的计算全息再现像放大技术[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0309001.
- 12 Yaraş F, Kang H, Onural L. Circular holographic video display system[J]. Opt Express, 2011, 19(10): 9147-9156.
- 13 王 辉. 数字化全息三维显示与检测[M]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- 14 Wang Hui, Jin Hongzheng, Wu Dongyuan, *et al.*. Information capacity and reduction in computing holographic three-dimensional display [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209012.
- 王 辉, 金洪震, 毋东元, 等. 计算全息三维显示的信息量及其简化[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209012.

栏目编辑: 何卓铭

光库通讯(珠海)有限公司 2014 年博士后招聘简章

一、公司简介

光库通讯(珠海)有限公司成立于 2000 年, 公司管理团队拥有美国硅谷著名光通讯公司 10 年以上成功的研发或管理经验, 拥有 12 项核心技术的自主知识产权。公司有多项产品技术处于世界领先水平, 目前拥有 4 名进站博士后, 还建有“院士专家企业工作站”和拥有 5 个专业光电实验室, 公司被认定为“国家高新技术企业”等称号。

二、博士后招聘信息

◆ 招收专业: 激光技术、激光物理、应用物理、电气工程及相关专业, 招收 5~10 人。

◆ 研究课题: 5 个主要研究方向:

- 1、超快光纤激光理论、实验及应用研究; 超快光脉冲与材料的相互作用之研究;
- 2、太赫兹的产生及应用研究;
- 3、光纤传感的理论、实验及应用研究; 光纤传感在物联网中的应用;
- 4、半导体激光的封装及应用研究;
- 5、高功率光学器件的理论、实验及应用研究。

◆ 招聘条件:

- 1、在国内外获得相关博士学位;
- 2、对光纤激光器或高功率光纤器件有一定了解;
- 3、年龄 40 岁以下, 身体健康。条件优越者可放宽年龄限制。

◆ 待遇:

- 1、工资及补贴每月 2 万元起, 具体面议;
- 2、提供专门的办公场所及相应科研设备, 提供充足的研发经费及其他资源;
- 3、享受其他珠海市政府及珠海国家高新区相关政策支持。如博士后研究人员出站后留珠海工作的, 享受珠海市政府一次性 15 万元安家费补助, 连续工作满 3 年的, 再给予 5 万元的生活补贴;

三、联系方式

联系人: 黄小姐、梁小姐 电话: 0756-3898061; 传真: 0756-3898080

E-mail: yihuang@fiber-resources.com 公司网址: www.fiber-resources.com

通讯地址: 广东省珠海市唐家湾镇南方软件园 B5 栋 2 层 邮政编码: 519080