

# 光场显微镜实现裸眼三维实时显示

戴志华 徐于萍 步 敬\* 杨 勇 赵 星 袁小聪

(南开大学现代光学所光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 提出了一种将光场显微镜与裸眼三维显示技术相结合的方法, 实现了利用光场显微镜对微观样品进行三维裸眼实时观察的技术。该技术将光场显微镜得到的子图像阵列直接投影在微透镜阵列的焦平面上, 在空间一定区域内双眼可分别观看到两幅不同视角图像, 使观察者产生立体视觉。该系统具有结构简单, 无需相干光源, 无需佩戴特殊眼镜, 可多人同时观看等优点, 应用前景广泛。

**关键词** 光学设计; 显微术; 光场显微镜; 三维显示

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1022005

## Light Field Microscope to Achieve Three-Dimensional Real-Time Naked-Eye Display

Dai Zhihua Xu Yuping Bu Jing Yang Yong Zhao Xing Yuan Xiacong

(Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education,  
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** Combining light field microscope and naked-eye three-dimensional display technique, a new method to realize real-time naked-eye observation of micro-specimen in a light field microscope is proposed. The sub-image array obtained by a light field microscope is projected on the focal plane of microlens array directly. Observers can see two perspective views of the specimen at the same time in a certain region and feel stereo effect because of binocular. The proposed method has advantageous properties including simple configuration, no requirement of coherent light source and allowing many people observing at the same time without wearing special glasses, and thus it has an important prospect of application.

**Key words** optical design; microscopy; light field microscope; three-dimensional display

**OCIS codes** 110.0180; 110.6880; 180.6900; 120.2040

## 1 引 言

显微镜为人类打开了微观世界的窗口, 自发明以来就受到各个科学领域的重视, 并已经在生物、医药和教育等领域得到广泛应用。其家族也不断在扩大, 从最基本的光学显微镜发展到了金相显微镜、电子显微镜和近场显微镜等, 使其成为一个热门的研究领域。近年来, 随着三维显示技术的发展, 实现利用光学显微镜对微观物品三维信息的获取与显示,

对进一步增强对微观物体的观察、识别起着重要作用。目前, 利用光学显微镜对微观物体的三维信息获取和显示的技术主要有: 通过光路设计使两眼看到样品两个视角产生立体视觉的体视显微镜, 通过扫描方法产生立体影像的方法如共焦扫描显微镜, 光学相干层析(OCT)<sup>[1]</sup>等, 其他方法有显微干涉术<sup>[2]</sup>、显微全息术和原子力显微镜<sup>[3]</sup>等。

本文介绍了一种利用光学投影再现显微光场的

**收稿日期**: 2012-02-29; **收到修改稿日期**: 2012-05-25

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327702)资助课题。

**作者简介**: 戴志华(1988—), 男, 硕士研究生, 从事三维显示和显微三维信息获取方面的研究。

E-mail: daizhihua2013@gmail.com

**导师简介**: 袁小聪(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事三维成像、光镊操纵和光学高灵敏度传感等方面的研究。

E-mail: xcyuan@nankai.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: jingbu@nankai.edu.cn

方式实现实时裸眼观察三维微观场景。在显微物镜成像面上放置微透镜阵列,由于微透镜阵列的多视角成像原理,在物镜后方用电荷耦合器件(CCD)接收,可以获得样品不同视角的信息,得到样品的光场<sup>[4]</sup>。通过对 CCD 得到的子图像阵列采用微透镜阵列直接投影,由于微透镜阵列的周期性折射作用,不同视角的图像以不同方向折射到空间中,在一定区域内,两幅不同视角图像分别进入观察者的左右两眼,根据双目视差原理,观察者可感觉到立体效果。实验证明,这种方法可以实时再现样品的三维结构,并可以跨地域地实时再现三维场景。且结构简单,无需相干光源,可多人同时裸眼观看,具有广泛的应用前景。

## 2 原 理

光场是自由空间中光线位置和角度的函数<sup>[4]</sup>,表征了自由空间物体的三维信息。在显微领域获取光场,可得到微观样品的三维信息,其获取光路如图 1 所示,对于传统光学显微镜,样品被显微物镜放大到目镜的焦平面上,经目镜进一步放大后成像于无穷远处供人眼观察。由于显微镜的光路结构限制,只能得到样品正投影的像,是一种缺乏立体感的平面图像。在光场显微镜<sup>[5]</sup>中,通过在物镜成像面上放置微透镜阵列,根据微透镜阵列的多视角成像原理<sup>[6]</sup>,在微透镜阵列后方放置 CCD,使得 CCD 和物镜关于微透镜成共轭关系,可以获得样品的光场,得到子图像阵列。微透镜阵列起到分割和成像的作用,一个微透镜只对一个样品点成像并形成一个子图像。来自样品点不同视角的光线被 CCD 上不同位置的像素记录。即子图像中不同位置的像素记录了对同一样品点不同视角的像。因此子图像阵列就记录有样品不同视角的像,也就是样品的表面三维结构。

如图 2 所示,根据微透镜阵列的多视角成像原理,样品点以不同视角成像在微透镜上形成一个子图像,所形成的不同视角的像被记录在 CCD 不同位置的像素上。得到的子图像阵列,如图 3(a)所示,包含了视场内所有样品点不同视角的像。由于微透镜阵列上所有透镜的参数一致,且呈方形紧密排列,所以每个子图像相同位置的像素代表了对应样品点同一视角的像,根据图 2 所示,所有样品点相同视角的像(图 2 中的实线、虚线和虚实线)分别成像在微透镜后相同位置的像素上。因此提取该位置像素合成一幅图片,就构成对样品一个视角的像<sup>[6]</sup>。对实

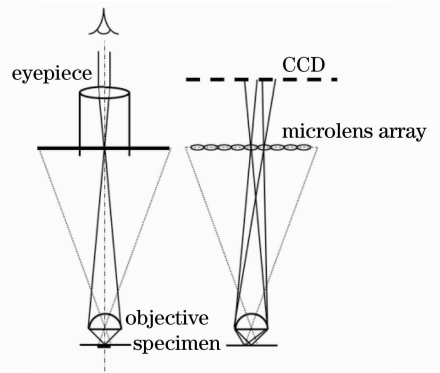


图 1 传统显微镜与光场显微镜对比图

Fig. 1 Schematic diagrams of conventional microscope and light-field microscope

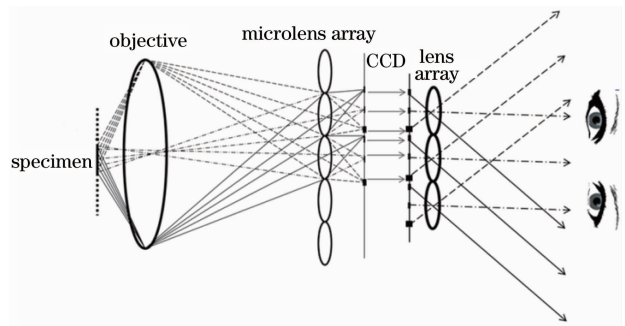


图 2 系统光路图

Fig. 2 Optical path of system

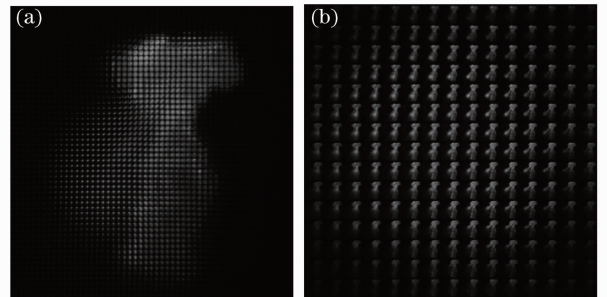


图 3 (a)子图像阵列和(b)提取像素后样品不同视角图

Fig. 3 (a) Sub-image array and (b) images with different angles of view after extracting pixels

验得到的子图像阵列[图 3(a)]进行提取像素处理得到了所有不同视角图像如图 3(b)所示,从中可以看出明显的视角差异。再现时,子图像阵列被投影到透镜阵列的焦平面上,且每个子图像对应一个透镜,不同位置像素以不同方向折射到无穷远空间,所有子图像相同位置的像素就以相同方向折射到空间中。由于所有子图像相同位置像素构成样品的一个视角的像,因此再现时,在空间不同位置就可以看到样品不同视角的像。提取像素合成不同视角图片就是对投影再现的一种模拟。在一定区域内,观看者

的双眼可以同时接收到两幅不同视角图像,基于双目视差原理感受到立体效果,且无需佩戴特殊眼镜<sup>[7,8]</sup>。由于 CCD 得到的子图像阵列是以二维数字图片形式存储并传输,因此在互联网的帮助下可以跨地域实时再现三维场景。与传统的对光场进行数字渲染重构三维场景的方法不同<sup>[9,10]</sup>,直接将光场显微镜得到的子图像阵列通过光学投影再现,实现了对微观样品的三维裸眼实时观看。

### 3 实验结果及计算

实验系统中的参数如表 1 所示,记录端的空间分辨率可表示为

$$R_{\text{spe}} = d/M, \quad (1)$$

式中  $d$  为微透镜尺寸,  $M$  为显微物镜的放大倍率。可计算出空间分辨率为  $2.7 \mu\text{m}$ 。对传统显微镜来说空间分辨率仅由物镜决定,可表示为

$$\sigma = \frac{0.61\lambda}{NA} = 516 \text{ nm} \approx 0.52 \mu\text{m}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为入射光的波长,取值  $550 \text{ nm}$ ,  $NA$  为数值孔径,视场大小为

$$L_{\text{sc}} = dg/M = 270 \mu\text{m}. \quad (3)$$

对物镜有

$$NA = n \sin \theta_{\text{ob}}, \quad (4)$$

则记录的视场角范围为  $2\theta_{\text{ob}} = 81.0^\circ$ ,  $n$  为空气折射率,  $\theta_{\text{ob}}$  为物镜的孔径角。角分辨率为能够分辨的最小角度,可表示为

$$R_{\text{ang}} = \frac{2\theta_{\text{ob}}}{N_{\text{p}}}, \quad (5)$$

$N_{\text{p}}$  是一个微透镜所成的子图像包含的像素个数,也就是包含的视角个数,视角个数越多则再现的立体感越好。本实验中得到的值为 15,因此可计算出  $R_{\text{ang}} = 2.89^\circ$ 。则系统的空间分辨率和角度分辨率的关系为

$$R_{\text{ang}} R_{\text{spe}} = \frac{d\theta_{\text{ob}}}{MN_{\text{p}}}, \quad (6)$$

其中等号右边为系统参数决定的定值。由此可以看出,空间分辨率和角分辨率相互限制。即为了提高角分辨率必须牺牲空间分辨率。和传统显微镜相比,本系统引入了角分辨率的概念,导致空间分辨率的下降。

表 1 实验仪器参数

Table 1 Parameters of experimental instrument

Device	Parameter	Value
Objective	$M/NA$	$40\times/0.65$
Microlens array	Lenslet spacing $d/\mu\text{m}$	108
	Focal length /mm	3
	Lenslet number $g$	$100\times 100$
	Arrangement	Rectangular and close to each other
CCD camera	Magnification	0.3~1
Colour CCD	Pixel number	1280 pixel $\times$ 1024 pixel
	Pixel size / $\mu\text{m}$	4.3
Projector	Resolution	1920 pixel $\times$ 1080 pixel
Lens array	Lenslet spacing $D/\text{mm}$	1
	Focal length $f/\text{mm}$	3.3
	Arrangement	Rectangular and close to each other

对显微镜,其景深为

$$D_{\text{dep}} = \frac{n\lambda}{NA^2} + \frac{ne}{MNA}, \quad (7)$$

其第一项是由于衍射造成的物理景深,第二项是由于接收器件的孔径(人眼或者 CCD)不是无限小而得到的几何景深,  $e$  为接收器能分辨的最小单元。对于数字显微镜, CCD 置于物镜成像面上直接接收,  $e$  为像素大小。计算出景深为

$$D_{\text{dep1}} = 1.47 \mu\text{m}, \quad (8)$$

同样可计算出采用投影再现的方法得到的景深为( $e$  为微透镜大小)

$$D_{\text{dep2}} = 5.45 \mu\text{m}, \quad (9)$$

由以上计算结果可知,虽然实验中牺牲了空间分辨率,但是提高了样品的景深,较大的景深意为着能更全面直观的观察三维结构。

再现端光路结构图,如图 4 所示。每个子图像被放置于对应透镜的焦平面上,子图像不同位置的像素以不同方向投射到空间中。在空间的一定区域内,观众的两眼将接收到两个视角的图像而产生立体感觉,这个区域就是三维显示器的立体可视区域。

由于子图像被放置于透镜焦平面处,成像于无

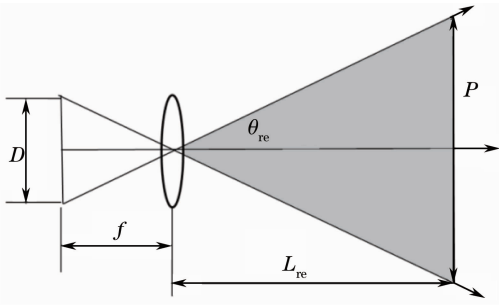


图 4 再现端结构图

Fig. 4 Schematic diagram of reproduction

穷远处,在空间一个位置只能看到一个像素的像,所以再现像的分辨率就是微透镜的尺寸为 1 mm。为使其产生立体效果,需使两眼接收到不同视角图像,则要求

$$N_p E \geq 2L_{re} \tan \theta_{re}, \quad (10)$$

式中  $\theta_{re}$  为透镜的孔径角,  $E$  为两眼间距取值 65 mm。  
 $\theta_{re} = 2\arctan(D/2f) = 17.2^\circ$ 。可得

$$L_{re} \leq \frac{N_p E f}{D} = 3.22 \text{ m}. \quad (11)$$

因此可以得到这样系统的立体可视区域,如图 4 中阴影部分所示。

搭建了一套实验系统实现了微观样品的三维裸眼实时观察。选取的样品是干枯的表皮组织。实验投影后在不同视角拍摄得到的图片如图 5 所示,拍摄得到的不同视角图片存在明显的视角差异,与用算法提取像素得到的结果[图 3(b)]相吻合。实验结果表明,在空间不同位置可以得到不同视角的像,当人眼在立体可视区域内,两眼可接收到不同观察视角的像,观察影像具有立体感,实现了对微观样品的三维实时裸眼观察。

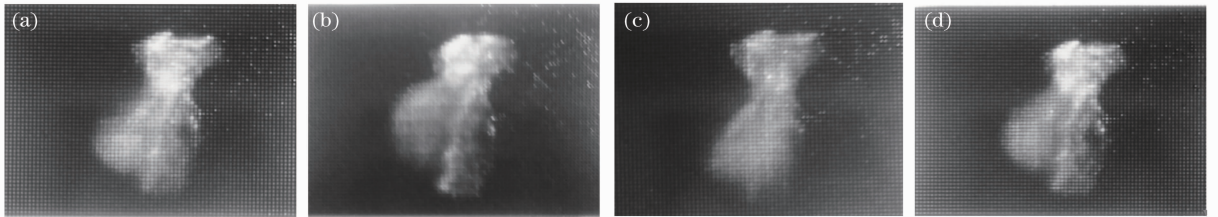


图 5 在观察空间以不同视角得到的图片。(a)上视图;(b)下视图;(c)左视图;(d)右视图

Fig. 5 Photos with different angles of view views obtained in observation space. (a) Top view; (b) bottom view; (c) left view; (d) right view

## 4 结 论

研究了一种利用光场显微镜对微观样品进行三维裸眼实时观察的方法,对光场显微镜得到的子图像阵列实现了光学投影再现。由于光场显微镜得到的子图像的编码方式就是透镜阵列投影再现所需图像源的编码方式,因此直接对子图像阵列进行投影即可实现对微观样品的三维实时裸眼再现。实验上得到了裸眼再现三维场景所需图像源,并实现了实时再现,得到了与计算机模拟提取像素相同的实验结果。系统结构简单,无需相干光源,并且可以跨地域实时再现三维场景。

## 参 考 文 献

- 1 Duan Lian, He Yonghong, Zhu Rui *et al.*. Development of a spectrum domain 3D optical coherence tomography system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2528~2533
- 段 炼,何永红,朱 锐等. 三维谱域光学相干层析成像系统的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2528~2533
- 2 Xue Liang, Lai Jiancheng, Wang Shouyu *et al.*. Application of microscopic interferometry for quantitative phase measurement of red blood cells[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3563~3567
- 薛 亮,来建成,王绶筠等. 显微干涉术在血红细胞光相位场定

- 量测量中的应用[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3563~3567
- 3 Jin Jingcheng, Jing Chunshui, Deng Wenyuan *et al.*. Testing method for optical supersmooth substrate surface by atomic force microscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1108002
- 靳京城,金春水,邓文渊等. 超光滑光学基底表面原子力显微镜测试方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1108002
- 4 Y. Wang, X. Y. Ji, Q. H. Dai. Key technologies of light field capture for 3D reconstruction in microscopic scene[J]. *Science China Information Sciences*, 2010, **53**(10): 1917~1930
- 5 Marc Levoy, Mark Horowitz, Ren Ng *et al.*. Light field microscopy[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2006, **25**(3): 924~934
- 6 Z. H. Dai, J. G. Wang, X. Zhao *et al.*. Fast acquisition of 3D images in a modified optical microscope based on integral imaging[J]. *Science China Information Sciences*, 2012, **55**(4): 977~981
- 7 Wang Qionghua, Wang Aihong. Survey on stereoscopic three-dimensional display [J]. *J. Computer Application*, 2010, **30**(3): 579~581
- 王琼华,王爱红. 三维立体显示综述[J]. *计算机应用*, 2010, **30**(3): 579~581
- 8 Zhang Chao, Wang Qionghua, Li Dahai *et al.*. Acquisition of parallax images for multi view auto stereoscopic display based on SIFT matching algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1989~1993
- 张 超,王琼华,李大海等. 基于 SIFT 匹配算法的多视点自由立体显示视差图像的生成[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1989~1993
- 9 M. Levoy, P. Hanrahan. Light field rendering[C]. *Proc. Computer Graphics, Ann. Conf. Series, SIGGRAPH*, 1996, 31~42
- 10 M. Levoy, Z. Zhang, I. McDowell. Recording and controlling the 4d light field in a microscope using microlens arrays[J]. *J. Microscopy*, 2009, **235**(2): 114~162