

## 激光与光电子学进展

## 基于柔性菲涅耳透镜阵列的仿生复眼

赵文雅, 张业灿, 焦永浩, 孙昊博, 苗宁德, 韩冬冬, 张永来\*

吉林大学电子科学与工程学院集成光电子国家重点实验室, 吉林 长春 130012

**摘要** 生物复眼具有良好的光学特性,如视野大、体积小、无像差、对运动物体敏感等。而对运动物体敏感对昆虫十分重要,如飞行昆虫觅食时需要追逐小型、快速移动的目标等。受昆虫复眼对运动物体敏感的启发,制备了具有5个小眼的单层复眼,每个小眼由1个菲涅耳透镜构成。通过飞秒激光双光子聚合加工技术和软光刻复写技术,制备出具有高精度和可重复性的柔性仿生复眼。实验结果表明,该仿生复眼可以获得可辨识的图像并且可以用于追踪运动目标。

**关键词** 飞秒激光; 激光技术; 柔性仿生复眼; 菲涅耳透镜; 软光刻

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230563

## Bionic Compound Eye Based on a Flexible Fresnel Lens Array

Zhao Wenya, Zhang Yecan, Jiao Yonghao, Sun Haobo, Miao Ningde,  
Han Dongdong, Zhang Yonglai\*State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,  
Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China

**Abstract** Biological compound eyes have excellent optical properties, including large field of view, small size, no aberrations, and sensitivity to moving objects. Sensitivity to moving objects is crucial for flying insects that chase small, fast-moving targets. Inspired by the sensitivity of compound eyes possessed by insects to moving objects, we prepared a single-layer bionic compound eye with five ommatidia, each consisting of a Fresnel lens. Using femtosecond laser two-photon polymerization processing technology and soft lithography technology, a flexible bionic compound eye with high accuracy and repeatability was prepared. Experimental results show that the prepared bionic compound eye could obtain high-quality images and be used to track moving targets.

**Key words** femtosecond laser; laser technology; flexible bionic compound eye; Fresnel lens; soft lithography

## 1 引言

昆虫复眼是一种小巧且精密的光电系统,通常由数以千计的呈半球形曲面排布的感光单元组成,每个感光单元由角膜透镜、晶锥、感杆束和视觉神经构成<sup>[1]</sup>。昆虫复眼具有体积小、质量轻、视场大、低像差、时间分辨率高,以及对运动物体敏感等特点。受到昆虫复眼的启发,人工仿生复眼系统应运而生,并在全景成像、无人机避障、医疗内窥镜、机器人视觉、测距测速、无人驾驶,以及导航等诸多领域展现出了广泛的应用前景<sup>[2-3]</sup>。其中,近距离三维成像对于显微镜和无人机等领域都起到十分重要的作用,这是因为这些领域都需要高速捕捉小目标<sup>[4]</sup>。随着计算机科学和图

像处理技术的快速发展,人们对光学成像系统的要求越来越高,传统的单孔光学系统已经不能满足工业检测、微型广角监视系统、目标跟踪和拦截等领域日益增长的需求。此外,受衍射极限等因素的影响,单孔光学系统小型化比较困难,因此设计一种视场大、质量轻、体积小、灵敏度高的多孔光学系统是十分有必要的<sup>[5-6]</sup>。

仿生复眼光学系统模仿生物复眼结构,通过在基底上阵列化、密集排布微透镜单元采集场景图像信息,从而实现大视场空间不同方位内的目标物光学信息的捕获。2001年,日本 Tanida 等<sup>[7]</sup>制备了名为紧凑复合光学观测模块(TOMBO)的经典复眼成像系统。这种仿生复眼系统是一种平面结构,由图像探测器、隔离

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-03-10; 录用日期: 2023-03-16; 网络首发日期: 2023-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(61935008)、国家重点研发计划(2022YFB4600403)

通信作者: \*yonglaizhang@jlu.edu.cn

层、微透镜阵列等几个部分组成。每个微透镜子单元与其对应的图像传感器组成一个光学单元,每个光学单元独立成像。相邻的两个单元之间由隔离层隔开,防止相邻单元成像出现串扰。2010年,Zhu等<sup>[8-9]</sup>将液体透镜运用到复眼系统的研究中,这也是首次将液体透镜与复眼联系在一起,实现了可变焦仿生复眼系统。通过调节镜片中液体的温度,控制透镜中弹性体的伸缩,从而改变镜片的面型,达到复眼透镜焦距可调的目的。2013年,Floreato等<sup>[10]</sup>研制了曲面仿生复眼(CurvACE),通过柔性电路板连接光学部件与光探测器阵列,利用精密切割使平面电路板变为曲面,可实现横向 $180^\circ$ 、纵向 $60^\circ$ 的大视场成像。且由于此仿生复眼体积小,可用于旋翼无人机前端作为避障传感器,完成复杂地形的飞行导航实验。

双光子吸收通常发生在激光聚焦的交点处,具有非线性吸收特点及良好的空间选择性,从而使得飞秒激光双光子聚合加工具有超高的加工精度并且可以加工任意复杂的三维结构<sup>[11-15]</sup>。飞秒激光由于逐点加工的优势,能够制备结构多样的复眼透镜阵列,这突破了传统复眼透镜阵列结构重复、曲率相同所带来的缺陷,在改进透镜光学性能上具有重要意义<sup>[16]</sup>。2015年,吉林大学Tian等<sup>[17]</sup>利用飞秒激光直写结构的优势,制备出了具有渐变焦距的平面复眼透镜(MLADC)。2020年,Cao等<sup>[18]</sup>通过集成可变形聚二甲基硅氧烷(PDMS)微透镜阵列与微流体室实现可变焦成像。通过调整注入腔室的水量,其可变视场高达 $180^\circ$ 。可调腔作为成像的主变焦镜头,其焦距可以从 $3.03\text{ mm}$ 变为无限远。这种变焦复眼结合了单眼和复眼的优点,为开发能够实现大视野和可变焦成像的先进微光学设备提供了广阔的前景。

PDMS薄膜材料是一种高介电柔性体材料,具备很多独特的优点。例如:PDMS薄膜具有较高的光学透明性( $>93\%$ )、较低的杨氏模量、良好的柔韧性和拉伸性等;同时,PDMS耐腐蚀性强并容易与电子材料相结合,在 $-60\text{ }^\circ\text{C}\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 内都具有良好的稳定性;此外,PDMS展现出了良好的生物相容性,被广泛应用于生物医学和组织工程等领域<sup>[19-20]</sup>。基于上述一系列优点,PDMS成为制备柔性仿生复眼的优选材料。

本文通过飞秒激光双光子聚合技术和软光刻复写技术成功制备了一种基于PDMS的柔性仿生复眼结构。对于平面仿生复眼结构和柔性仿生复眼结构,分别对其进行形貌表征和成像效果测试,两者均展现出了较为平整的表面形貌和良好的成像效果。最后利用柔性仿生复眼对运动物体进行实时的成像检测,实验结果表明,该柔性仿生复眼具有辨识运动目标的能力。

## 2 方法与材料

### 2.1 光刻胶的制备

将质量比为3:1的负性SU-8-2025光刻胶<sup>[21-22]</sup>和

环戊酮混合均匀,静置12 h。将静置后的SU-8光刻胶滴到预先清洁的盖玻片上。然后,将样品在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的热板上加热1 h以除去有机溶剂。固化后,将样品冷却至室温备用。

### 2.2 PDMS制备

将PDMS(折射率1.47)与交联剂以10:1的质量比混合均匀,混合均匀后将其置于真空箱中抽真空20 min以去除气泡,以供后续使用。

### 2.3 表面氟化硅烷处理

在第1次软光刻得到的模板上滴氟化硅烷1~2滴,将其放入培养皿中并用保鲜膜缠绕,再将其放入烘箱, $95\text{ }^\circ\text{C}$ 下加热4~6 h,以供后续使用。

### 2.4 结构表征

结构的表面形态通过场发射电子显微镜(SEM, JSM-7500F, JEOL)表征。样品的三维轮廓通过激光扫描共焦显微镜(LSCM, OLS4100, 奥林巴斯)表征。使用透射光学显微镜(CX41, Olympus)获得样品的光学图像。

## 3 分析与讨论

微型衍射光学元件是一种通过干涉和衍射来产生所需光场的超薄相位元件<sup>[23-24]</sup>,通过表面的浮雕结构对入射光相位进行调制,可以在输出面得到任意形状光斑。传统折射光学元件<sup>[25-26]</sup>利用器件的三维曲面来偏转光线,光线的偏转程度与器件的曲率直接相关,通常为了实现大的偏转需要器件具有较大的结构厚度。而衍射光学元件利用平面光栅图案的几何形状来调控光的出射路径,光线的偏转程度与结构周期相关而与结构厚度无关<sup>[27]</sup>,由衍射微光学元件构成的微光学系统在很多方面都更具优势。衍射光学元件实现了复杂的光学性能,而这些功能其他单一光学组件无法获得的,并且衍射光学元件在单一波长下工作。除此之外,与传统折射光学元件相比,衍射光学元件扁平且轻薄,使其成为注重紧凑性系统的完美解决方案;衍射光学元件是无源元件,根据基底的不同,可以非常坚固,因此可以在任何系统和环境条件下随着时间完美预成型;由于生产精度高,衍射光学元件具有完美的角度精度,几乎没有成型或分束角度公差。所以对于复眼结构,选择衍射光学元件——菲涅耳透镜作为单个小眼。

### 3.1 平面仿生复眼的制备与表征

基于飞秒激光在精密加工方面的独特优势,本实验选用飞秒激光双光子聚合加工作为平面仿生复眼的制备手段。为完成平面仿生复眼的制备,实验团队自行搭建了飞秒激光加工系统。图1(a)为飞秒激光双光子聚合加工系统装置示意图。在本实验中,使用的加工系统为基于商用电压计的飞秒激光双光子聚合处理系统(Maleon Nano系统,集成超快设备有限公司)。首先,近红外激光(ErFemto-780MP,中心波长780 nm,脉冲长度100 fs,脉冲重复频率80 MHz)通过高数值孔

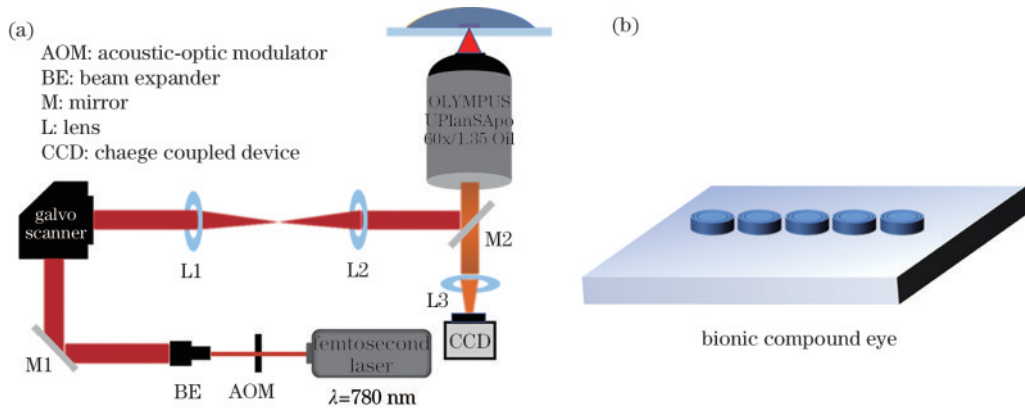


图 1 平面仿生复眼的制备过程。(a)飞秒激光双光子聚合加工系统光路示意图;(b)通过飞秒激光双光子聚合加工制备的平面仿生复眼

Fig. 1 Preparation process of plane bionic compound eye. (a) Schematic diagram of optical path of femtosecond laser two-photon polymerization processing system; (b) the plane bionic compound eye prepared by femtosecond laser two-photon polymerization processing

径物镜( $\times 60$ ,数值孔径 1.35,奥林巴斯)紧密聚焦到光刻胶中[图 1(a)]。物镜前测得的激光功率为 18~20 mW。处理数据被转换为间距为 150 nm 的 3D 点云,单点曝光时间为 300  $\mu\text{s}$ 。加工完成后,将样品在丙酮溶液中浸泡 30 s 以去除未曝光的光刻胶。所有这些过程都在黄光环境中进行,以避免样品的整体暴露。显影后,将复眼样品在空气中快速干燥,最终得到图 1(b)所示的复眼。

将预先涂有 SU-8 光刻胶的盖玻片固定在位移台表面,调节平台的高度使激光聚焦到 SU-8 和载玻片交界处,调整加工参数,设置点线层参数为 150 nm,单

点曝光时间为 300  $\mu\text{s}$ 。根据之前的经验,将加工功率范围确定在 10~20 mW,进行加工以摸索功率参数。图 2(a)展示了不同加工功率下制备的菲涅耳透镜的激光共聚焦显微镜图像。从图 2(a)的测试结果可以看出,12 mW 和 14 mW 功率下制备的子眼结构机械强度不足,难以维持三维形貌,18 mW 功率下所制备的结构形貌相对更完整,在高度方面也更加符合要求。为了进一步验证这一结果,对功率为 18 mW 下制备的单个子眼进行了 SEM 表征,从图 2(b)的测试结果来看,18 mW 功率下制备的子眼结构也比较好,所以确定最佳的功率参数为 18 mW。

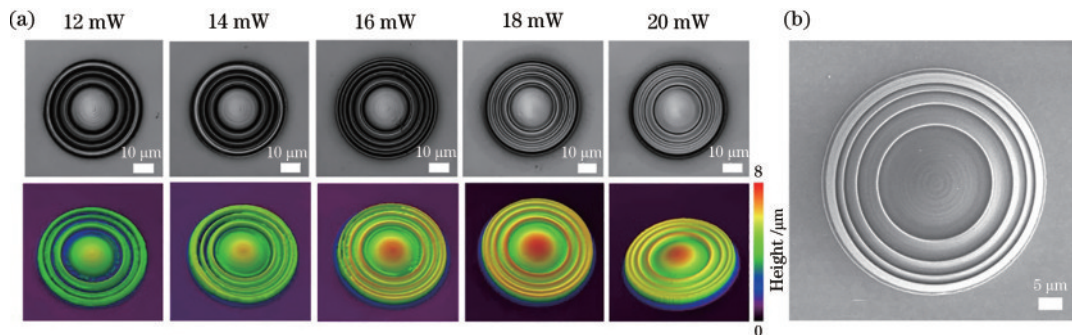


图 2 子眼的结构表征。(a)不同功率下子眼的激光共聚焦显微镜图像;(b)功率为 18 mW 时子眼的 SEM 图像

Fig. 2 Structure characterization of ommatidium. (a) The laser scanning confocal microscope images of ommatidia at different powers; (b) SEM image of ommatidium at 18 mW

在确定了最佳参数之后,在最佳参数条件下制备仿生复眼阵列。在实验过程中发现,当小眼直径为 50  $\mu\text{m}$  时所加工的复眼阵列的尺寸大于 200  $\mu\text{m}$ ,得到的复眼阵列平整度不佳,小眼无法保持在同一平面上。因此,将单个小眼的直径从 50  $\mu\text{m}$  减小到 30  $\mu\text{m}$ ,锯齿数量从 5 减小到 3,每个小眼的间距为 10  $\mu\text{m}$ ,总长度为 190  $\mu\text{m}$ ,同时也能够提高加工效率,减少加工时间。图 3(a)、(b)是仿生复眼阵列的激光共聚焦显微镜(LSCM)图像和三维图像,图 3(c)是仿生复眼阵列的

SEM 图像,图 3(d)是仿生复眼阵列中单个小眼激光共聚焦显微镜图像的细节图,图 3(e)是仿生复眼阵列中单个小眼 SEM 图像的细节图。从图 3 可以看出,仿生复眼的形貌清晰完整。

为了验证平面仿生复眼中每个小眼的均匀性,利用激光共聚焦显微镜测量每个小眼的高度和直径,图 4(a)、(b)中右侧的高度和宽度分别表示每个小眼的高度和直径,每个小眼设计的结构高度为 3.8  $\mu\text{m}$ ,底座高度为 2  $\mu\text{m}$ ,直径为 30  $\mu\text{m}$ 。图 4 中的数据表明,

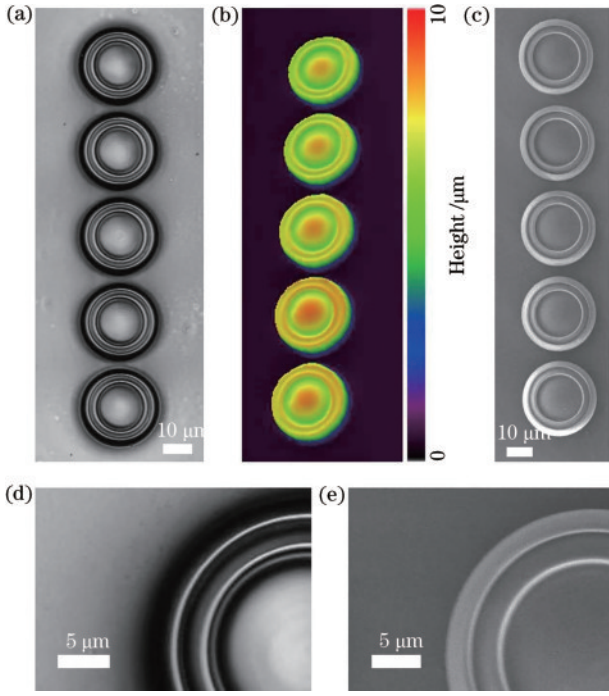


图3 平面仿生复眼的形貌表征。(a)激光共聚焦显微镜图像；(b)激光共聚焦显微镜三维图像；(c) SEM图；(d)激光共聚焦显微镜局部细节图；(e) SEM局部细节图

Fig. 3 Morphological characterization of planar bionic compound eyes. (a) Laser confocal microscope image; (b) laser confocal microscope three-dimensional image; (c) SEM image; (d) partial details of laser confocal microscope; (e) partial details of SEM

每个小眼的高度和直径相差不大,证明了每个小眼在尺寸方面的均匀性。

### 3.2 柔性仿生复眼的制备与表征

软光刻是一种比较成熟的微结构转印技术,能够实现纳米级尺度微结构的完美复刻<sup>[28-29]</sup>。实验中所使用的转印材料是PDMS,它是一种透明度高、稳定性好的生物兼容材料。

接下来,对得到的复眼进行两次软光刻,如图5(a)所示。首先将体积为5 mL的PDMS混合物滴涂在含有模板结构的盖玻片上并使用匀胶机旋涂。旋涂参数如下:转速为1500 r/min,旋涂时间为15 s。旋涂完毕后将涂有PDMS混合物的盖玻片放入烘箱中固化2 h,自然晾干后将PDMS剥离开,即可得到具有复眼反结构的PDMS,如图5(b)所示。为了防止第二次软光刻得到的PDMS薄膜难以剥离,对第一次软光刻得到的PDMS反结构进行表面氟化硅烷处理。然后,以PDMS反结构作为模板,再次进行软光刻复写,如图5(c)所示,步骤与第一次相同,最后晾干将PDMS剥离开,得到如图5(d)所示的柔性仿生复眼。

通过两次软光刻,对所得到的柔性仿生复眼进行了形貌表征,图6(a)是柔性仿生复眼的激光共聚焦显微镜(LSCM)图像,图6(b)是利用激光共聚焦显微镜表征的三维图像,图6(c)是SEM图像。从表征结果来看,所制备的柔性仿生复眼表面较为清晰完整,表明柔性仿生复眼较好地复写了平面仿生复眼的形貌。

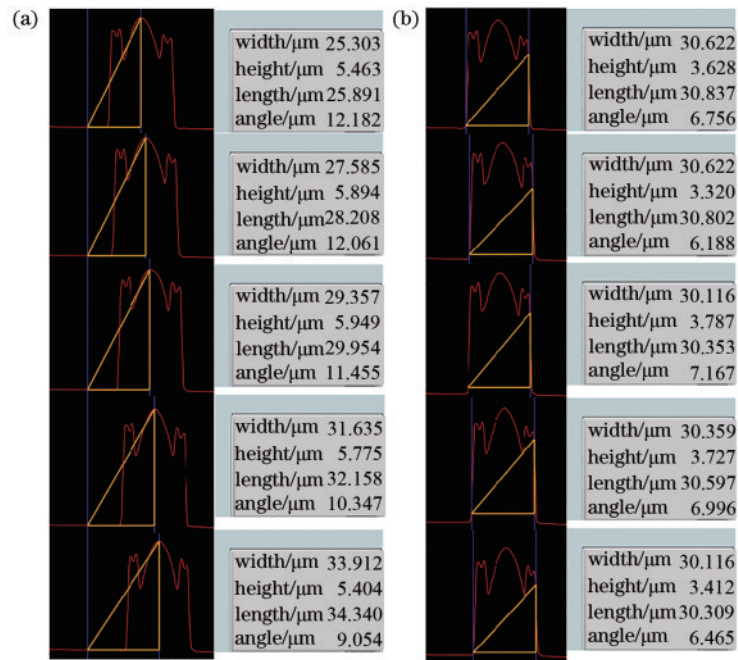


图4 平面仿生复眼高度和直径的测量。(a)每个小眼的高度测量结果,分别为5.463、5.894、5.949、5.776、5.404  $\mu\text{m}$ ; (b)每个小眼的直径测量结果,分别为30.622、30.622、30.116、30.369、30.116  $\mu\text{m}$

Fig. 4 Measurement of the height and diameter of the plane bionic compound eye. (a) The height measurement results of each small eye, are 5.463, 5.894, 5.949, 5.776 and 5.404  $\mu\text{m}$  respectively; (b) the diameter measurement results of each small eye, are 30.622, 30.622, 30.116, 30.369 and 30.116  $\mu\text{m}$  respectively

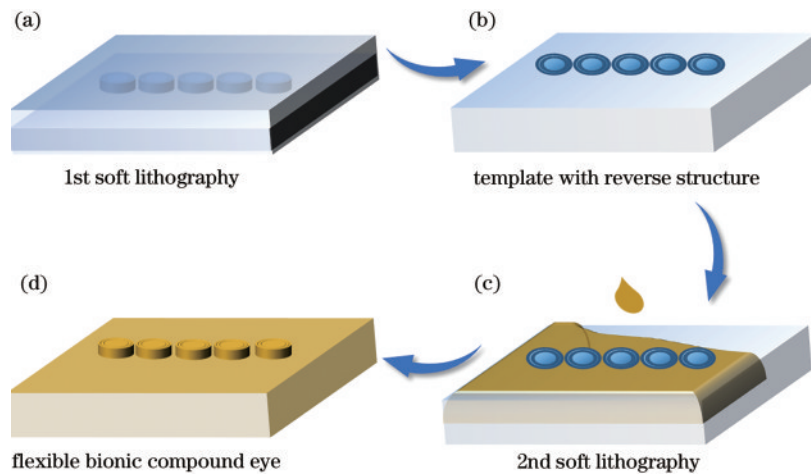


图5 柔性仿生复眼的制备过程。(a) 在得到的平面仿生复眼表面旋涂一层PDMS并在80 °C下固化;(b) 软光刻复写得到的具有反结构的复眼模板;(c) 对氟化硅烷处理过的模板进行软光刻复写并在80 °C下固化;(d) 得到的柔性仿生复眼

Fig. 5 Preparation process of flexible bionic compound eye. (a) A layer of PDMS spun on the surface of the obtained bionic compound eye and solidified at 80 °C; (b) compound eye template with reverse structure obtained by soft lithography; (c) the template treated with fluorinated silane copied by soft lithography and cured at 80 °C; (d) the obtained flexible bionic compound eye

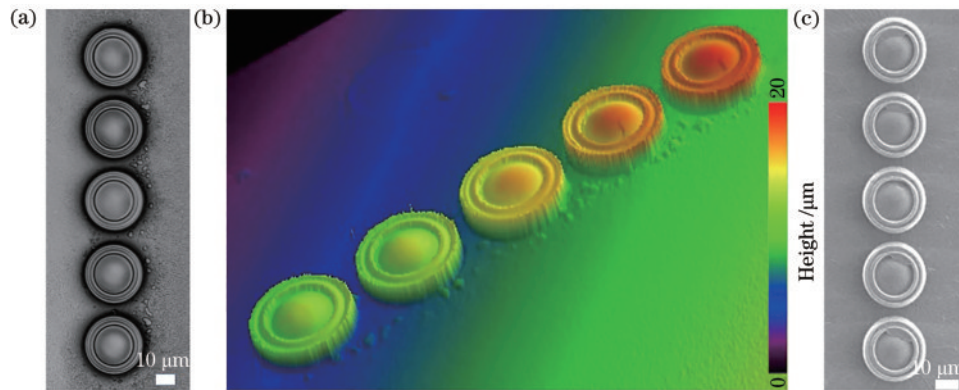


图6 柔性仿生复眼的形貌表征。(a)激光共聚焦显微镜图像;(b)激光共聚焦显微镜三维图像;(c) SEM图像

Fig. 6 Morphological characterization of flexible bionic compound eye. (a) Laser confocal microscope image; (b) laser confocal microscope three-dimensional image; (c) SEM image

为了测试柔性仿生复眼的光学性能,首先搭建了测试系统,使用10×物镜、复眼、掩模版、光源和CCD组成的显微成像系统采集柔性仿生复眼产生的焦斑和图像。为了使柔性仿生复眼保持弯曲,定制了直径为5 mm的亚克力空心管,将柔性仿生复眼放置于管子的弯曲面上并沿着弯曲面进行弯曲和固定,以保证其弯曲程度从而进行光学性能测试。对于曲面的柔性仿生复眼,并不能找到一个合适的位置能够一次收集到所有子眼的清晰焦点和所成的像,原因在于弯曲复眼的焦面也是弯曲的,这就与平面的CCD图像传感器出现不匹配的问题。退一步,找到了一个合适的位置能够一次收集到所有子眼清晰的焦点,并且使用一个被照明的字母S作为成像对象。每个子眼单独聚焦的焦点如图7(a)所示。通过调整柔性仿生复眼的位置,可以使每个子眼单独聚焦并形成清晰的图像,如图7(b)所示。聚焦和成像测试结果表明,柔性仿生复眼展现出

了较好的光学性能,符合预期要求。

众所周知,昆虫的复眼对运动的物体非常敏感,当目标移动时,复眼中的每个小眼依次成像,产生闪烁效应<sup>[30]</sup>。因此,昆虫能够实时感知出天敌或者是猎物的移动方向和速度,从而作出有效的反馈。受昆虫复眼闪烁效应的启发,本实验组利用柔性仿生复眼来采集运动物体图像,并完成对运动目标的探测和追踪。

为了验证柔性仿生复眼对运动宏观目标的成像能力。使用图8(a)所示的成像装置进行运动检测,将一个带有已知尺寸(边长10 mm)的三角形透光孔的掩膜沿着图中箭头的方向匀速运动,同时用与图7相同的PDMS柔性仿生复眼来捕获三角形透光孔运动过程中的图像。在物体运动的过程中,当三角形透光孔在两个不同的空间位置时,由柔性仿生复眼捕获的相应的图像如图8(b)、(c)所示。从图中可以看出,所制备的柔性仿生复眼对运动物体展现出初步的运动检测能力。

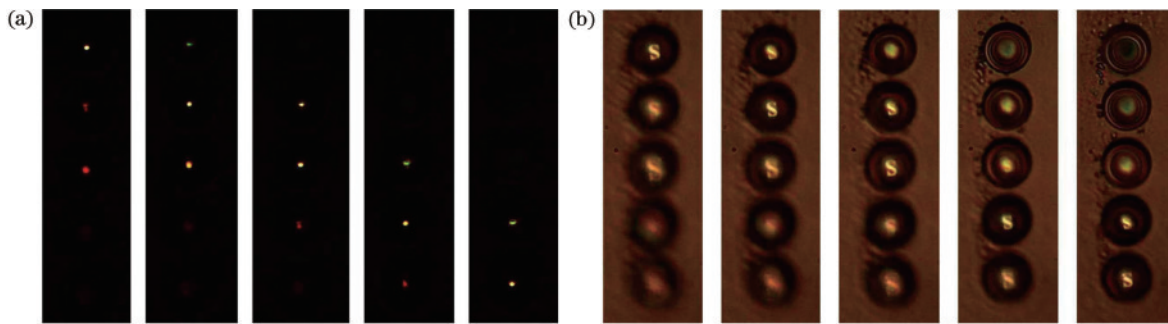


图7 柔性仿生复眼的聚焦和成像特性。(a)柔性仿生复眼的聚焦结果;(b)柔性仿生复眼的成像结果

Fig. 7 Focusing and imaging characteristics of the flexible bionic compound eye. (a) Focusing results of flexible biomimetic compound eyes; (b) imaging results of flexible biomimetic compound eyes

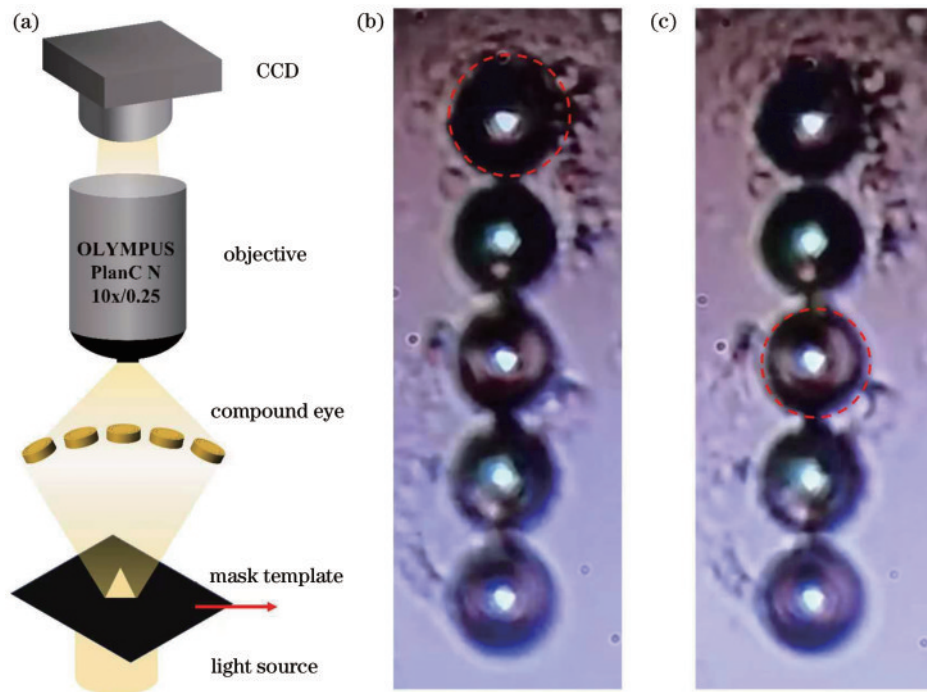


图8 利用柔性仿生复眼进行的运动监测。(a)运动监测的实验装置示意图;(b)第1个小眼捕获的图像;(c)第3个小眼捕获的图像  
Fig. 8 Motion monitoring using flexible bionic compound eyes. (a) Schematic diagram of experimental device for motion monitoring; (b) image captured by the first small eye; (c) image captured by the third small eye

## 4 结 论

利用飞秒激光双光子聚合加工技术在光刻胶中加工出平面复眼结构,并通过两次软光刻复写得到了柔性仿生复眼。对平面复眼结构和柔性仿生复眼进行形貌表征和静态成像测试,并对柔性仿生复眼进行动态成像检测,结果表明,平面复眼结构的形貌和成像效果良好,并且柔性仿生复眼很好地复写了平面复眼结构,同样展现出了平整的形貌和良好的成像效果。这种形貌和成像良好的柔性仿生复眼可以很容易地通过软光刻重复出来,具有很高的可重复性。所制备柔性仿生复眼能够对运动的三角形形状实时成像且成像效果良好。

### 参 考 文 献

[1] Ma Z C, Hu X Y, Zhang Y L, et al. Smart compound

eyes enable tunable imaging[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(38): 1903340.

[2] Lin R J, Su V C, Wang S M, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.

[3] Lee G J, Choi C, Kim D H, et al. Bioinspired artificial eyes: optic components, digital cameras, and visual prostheses[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(24): 1705202.

[4] Sitalakshmi B, Vudayagiri A, Sreedhar S, et al. On-axis time-resolved spatial characterization of shock-induced refractive fringes in liquid water[J]. *Journal of The Optical Society of America B*, 2013, 30(8): 2206-2214.

[5] Wang Y W, Cai B L, Lu Y, et al. Optical system design of artificial compound eye based on field stitching[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(6): 1277-1279.

[6] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. High performance

- imaging using large camera arrays[C]//SIGGRAPH '05: ACM SIGGRAPH 2005 Papers, July 3, 2005, Los Angeles, California. New York: ACM Press, 2005: 765-776.
- [7] Tanida J, Kumagai T, Yamada K, et al. Thin observation module by bound optics (TOMBO): concept and experimental verification[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(11): 1806-1813.
- [8] Zhu D F, Zeng X F, Li C H, et al. Focus-tunable microlens arrays fabricated on spherical surfaces[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20(2): 389-395.
- [9] Zhu D F, Li C H, Zeng X F, et al. Tunable-focus microlens arrays on curved surfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(8): 081111.
- [10] Floreano D, Pericet-Camara R, Viollet S, et al. Miniature curved artificial compound eyes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(23): 9267-9272.
- [11] 胡昕宇, 马卓晨, 韩冰, 等. 飞秒激光制备蛋白质智能软体执行器[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402001.  
Hu X Y, Ma Z C, Han B, et al. Femtosecond laser fabrication of protein-based smart soft actuators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402001.
- [12] 刘雨晴, 张嘉芮, 韩冬冬, 等. 激光加工石墨烯传感器和执行器研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1502003.  
Liu Y Q, Zhang J R, Han D D, et al. Recent progress in laser-processed graphene for sensors and actuators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1502003.
- [13] 矫知真, 李纪超, 陈招弟, 等. 激光加工减反射表面研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202011.  
Jiao Z Z, Li J C, Chen Z D, et al. Research progress on laser processing of antireflection surfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202011.
- [14] 李纪超, 陈招弟, 韩冬冬, 等. 超疏水聚偏氟乙烯的激光加工[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202002.  
Li J C, Chen Z D, Han D D, et al. Laser processing of polyvinylidene fluoride with superhydrophobicity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202002.
- [15] 刘絮飞, 韩丹翱, 郭慧, 等. 基于飞秒激光微纳结构化聚四氟乙烯材料的表面增强拉曼散射基底[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(23): 2314011.  
Liu X F, Han D A, Guo H, et al. Surface enhanced Raman scattering substrates based on femtosecond laser structured polytetrafluoroethylene[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2314011.
- [16] 朱琳, 高圆圆, 胡昕宇, 等. 飞秒激光仿生复眼制造进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(12): 1254-1267.  
Zhu L, Gao Y Y, Hu X Y, et al. Progress in femtosecond laser fabrication of artificial compound eye [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(12): 1254-1267.
- [17] Tian Z N, Yao W G, Xu J J, et al. Focal varying microlens array[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4222-4225.
- [18] Cao J J, Hou Z S, Tian Z N, et al. Bioinspired zoom compound eyes enable variable-focus imaging[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(9): 10107-10117.
- [19] Qin D, Xia Y N, Whitesides G M. Soft lithography for micro- and nanoscale patterning[J]. *Nature Protocols*, 2010, 5(3): 491-502.
- [20] Gao X, Yan X, Yao X, et al. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(17): 2213-2217.
- [21] Gailevičius D, Padolskytė V, Mikoliūnaitė L, et al. Additive-manufacturing of 3D glass-ceramics down to nanoscale resolution[J]. *Nanoscale Horizons*, 2019, 4(3): 647-651.
- [22] Ovsianikov A, Viertl J, Chichkov B, et al. Ultra-low shrinkage hybrid photosensitive material for two-photon polymerization microfabrication[J]. *ACS Nano*, 2008, 2(11): 2257-2262.
- [23] Stern L, Bopp D G, Schima S A, et al. Chip-scale atomic diffractive optical elements[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-7.
- [24] Ruffato G, Massari M, Romanato F. Multiplication and division of the orbital angular momentum of light with diffractive transformation optics[J]. *Light, Science & Applications*, 2019, 8: 113.
- [25] Thiele S, Arzenbacher K, Gissibl T, et al. 3D-printed eagle eye: compound microlens system for foveated imaging[J]. *Science Advances*, 2017, 3(2): e1602655.
- [26] Gissibl T, Thiele S, Herkommer A, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(8): 554-560.
- [27] Banerji S, Meem M, Majumder A, et al. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? [J]. *Optica*, 2019, 6(6): 805-810.
- [28] Austin M D, Ge H X, Wu W, et al. Fabrication of 5nm linewidth and 14nm pitch features by nanoimprint lithography[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(26): 5299-5301.
- [29] Schift H. Nanoimprint lithography: an old story in modern times? A review[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2008, 26(2): 458.
- [30] Hu Z Y, Zhang Y L, Pan C, et al. Miniature optoelectronic compound eye camera[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-10.