

## 基于六边形紧密拼接结构的仿生复眼系统设计

苏鹏程, 陈 宇, 张家铭, 杨 超

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 基于仿生复眼的视觉优势, 分析了仿生复眼的研究进展, 对复眼的成像原理及部分昆虫复眼的结构进行了研究。根据生物复眼的结构形态, 设计了六边形紧密拼接形式的曲面微透镜阵列及转像系统。同时, 为了防止相邻子眼间的成像光束串扰, 设计了单个光阑长度为 1.5 mm 的光阑阵列, 实现了各子眼的单通道成像。根据光瞳衔接原则, 对微透镜阵列和转换系统进行组合并优化。整个复眼的口径为 8.66 mm, 视场角为 121°, 每个子眼的口径为 500  $\mu\text{m}$ , 子眼视场角为 6°, 在 90 lp/mm 处, 复眼系统的 MTF 值均大于 0.3, 其 RMS 半径均小于艾里斑半径, 系统成像质量达到设计要求。为满足 3D 增材制造工艺需求, 设计了复眼系统的机械结构。公差分析结果表明, 3D 增材制造工艺可以满足系统的像质要求。

**关键词:** 多孔径光学系统; 仿生复眼; 六边形子眼; 微透镜阵列; 光阑阵列

**中图分类号:** O439      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200338

## Design of bionic compound eye system based on hexagonal closely spliced structure

Su Pengcheng, Chen Yu, Zhang Jiaming, Yang Chao

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Based on the visual advantages of bionic compound eyes, the research progress of bionic compound eyes was analyzed, and the imaging principle of compound eyes and the structure of some insect compound eyes were studied. According to the structure of the biological compound eye, a hexagonal closely spliced curved micro-lens array and image transfer system were designed. At the same time, in order to prevent the crosstalk of imaging beams between adjacent sub-eyes, an aperture array with a single aperture of 1.5 mm in length was designed to realize single-channel imaging of each sub-eye. According to the principle of pupil connection, the micro lens array and the conversion system were combined and optimized. The diameter of the entire compound eye was 8.66 mm, the field of view was 121°, the diameter of each sub-eye was 500  $\mu\text{m}$ , and the field of view of the sub-eye was 6°. At 90 lp/mm, the MTF value of the compound eye system was greater than 0.3, and the RMS spot radius were less than the radius of the Airy disk, the imaging quality of the system meet the requirements of the design index. In order to met the requirements of 3D additive manufacturing process, the mechanical structure of the compound eye system was designed. The tolerance analysis result shows that the system structure meets the preparation requirements of 3D printing technology.

**Key words:** multi-aperture optical system; bionic compound eyes; hexagonal sub-eye; micro-lens array; aperture array

收稿日期: 2020-09-07; 修订日期: 2020-12-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1105400)

## 0 引言

光学系统的像差一般由该系统的孔径和视场决定,大视场单孔径成像光学系统若孔径较大,则很难解决大孔径和大视场带来的像差问题。受启发于生物复眼的视场大、体积小、灵敏度高视觉优势,人们提出了仿生复眼成像系统。复眼是自然界创造的高阶光学系统,由多个子眼组成,并有序分布在球面或椭球面上。目前,仿生复眼在国际上已经得到了广泛应用。

从 20 世纪中后期开始, H.B.Barlow、M.F.Land 等学者对复眼的研究已经不仅仅停留在生物学角度,而是转向了光学方向。20 世纪后期,科研工作者提出了许多具有代表性的仿生复眼结构,但是由于加工技术的不成熟,大量的仿生复眼系统仅停留在设计阶段,其中多以平面型复眼为主。进入 21 世纪,无论是精密加工技术还是复眼像质优化技术都取得了长足进步,科研人员也开始从平面型复眼研究逐渐转向曲面型复眼研究。

张红鑫科研团队提出一种曲面基底微透镜阵列的方法,应用于多孔径成像系统中来解决复眼系统中视场小、边缘视场成像质量差的问题。设计了两种类型的复眼结构——即单层曲面复眼和三层曲面复眼。虽然成像质量有所改善,但其最大视场只有  $88^\circ$ , 未能实现复眼系统的大视场优势,并且子透镜为圆型结构不能实现对球壳基底的最大利用率<sup>[1]</sup>。雷卫宁科研组对具有大视场的复眼成像探测系统结构进行了分析和研究,并设计了一款复眼结构,该系统由 37 个子眼组成,视场可达到  $150^\circ$ , 该系统虽然实现了复眼大视场的优点,但其复眼球壳的半径达到 90 mm,子眼通光口径为 6 mm<sup>[2]</sup>。

文中提出一种基于六边形子眼的紧密拼接结构的仿生复眼系统,由微透镜阵列、光阑阵列、转像系统三部分组成,其中微透镜阵列由六边形子眼紧密拼接构成,光阑阵列与转像系统紧随其后。整个复眼的口径仅为 8.66 mm,视场角  $121^\circ$ ,具有视场大、体积小、质量轻等优点,若应用于机器视觉等相关领域,可实现系统的小型化和轻量化。

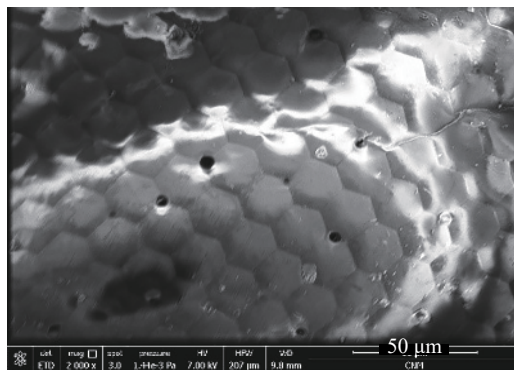
## 1 复眼结构

昆虫复眼可以看作是一种智能的多孔径光学系统,因其具有独特的面型结构,所以有着非常大的成像视场<sup>[3]</sup>。昆虫的多个子眼可以对同一物体成像,且具有高度集中的中枢神经系统,它还可以对运动中的物体进行高灵敏度的识别和定位<sup>[4]</sup>。

昆虫复眼的子眼数量从少于十个到数万不等,每个子眼都可以看作是一个单独的成像系统,通常包括角膜、晶锥和感杆束等。角膜在复眼的最外层,呈六边形分布,有着较高的折射率,类似于光学系统的透镜,起到保护内部结构的作用。角膜的下方是晶锥,呈圆锥状,它的形态可以随着入射光的强度变化而改变<sup>[5-7]</sup>。感杆束具有光敏特性,由多个感杆聚集而成。

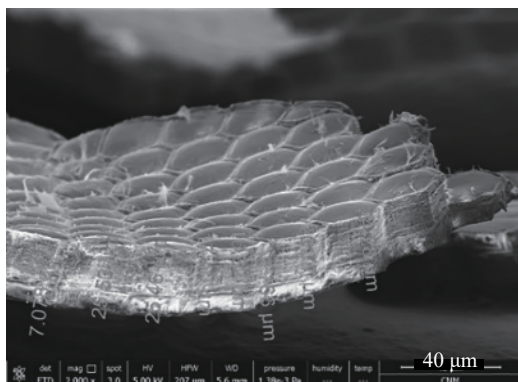
根据成像原理的差异,自然界昆虫复眼类型可分为两种:并列型复眼和重叠型复眼<sup>[8]</sup>。并列型复眼的一个感杆束只能接收一个子眼的成像光束,而重叠型复眼则是一个感杆束接收多个子眼的成像光束。由于重叠型复眼的特殊结构,导致其像差很大,成像分辨率较低。因此,文中仅针对并列型复眼进行分析和研究。

利用扫描电子显微镜,通过分析蜜蜂、蝗虫和瓢虫的复眼切片,对各复眼的表面形貌、子眼结构及其衔接方式进行研究,如图 1 所示。研究结果表明,以上昆虫的复眼形状均为球冠状,子眼均以六边形紧密拼接形式衔接,子眼口径约为  $20\ \mu\text{m}$ 。该结构为生物进化过程中优胜劣汰的自然选择结果,也为仿生复眼系统的设计提供了理论支撑<sup>[9]</sup>。

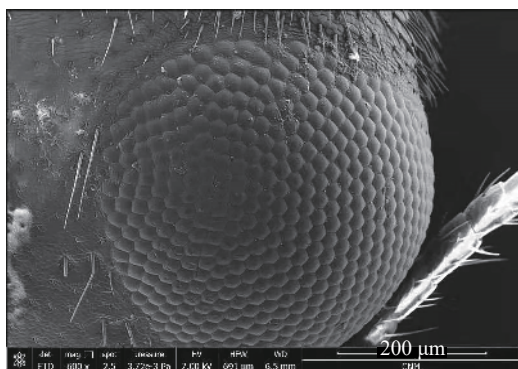


(a) 蜜蜂复眼微观结构

(a) Microstructure of apidae compound eye



(b) 蝗虫复眼微观结构  
(b) Microstructure of grasshopper compound eye



(c) 瓢虫复眼微观结构  
(c) Microstructure of ladybug compound eye

图 1 复眼微观图

Fig.1 Microscopic view of compound eye

## 2 微透镜的设计、阵列及光阑的设置

文中基于该结构类型的复眼,设计了一种六边形子眼紧密拼接形式的曲面微透镜阵列,该结构既能满足复眼对于大视场的需求,又可使整个结构紧凑,提高复眼球壳基底的空间利用率<sup>[10]</sup>。

在设计子眼透镜时,为了实现物空间的完整成像,相邻子眼间的视场要有一定的重叠比例,保证各个子眼在成像后,像面可以通过后期图像处理算法拼接在一起,组成一个新的完整的像面。同时在保证大视场的前提下,要使得子眼的成像区域不发生重叠,便于后期进行图像处理和图像拼接。综上所述,即要保证其大视场优势,又要有一定重叠比例,所以子眼视场角 $\Delta\theta$ 与子眼间夹角 $\Delta\varphi$ 的关系应满足: $\Delta\varphi < \Delta\theta < 2\Delta\varphi$ 。

子眼间夹角与复眼参数的关系为:

$$\Delta\phi = \arctan \frac{2a}{R} \quad (1)$$

如图 2 所示, $a$  为子眼的半口径, $R$  为复眼所在的球壳基底的曲率半径。

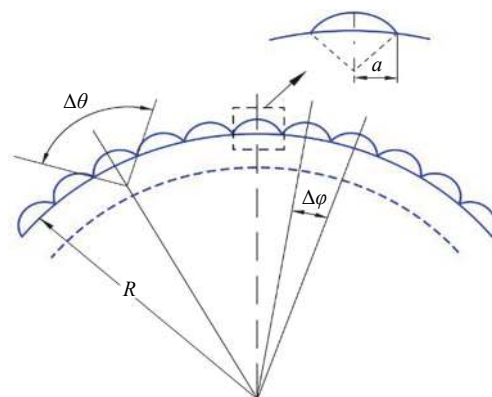


图 2 微透镜阵列结构示意图

Fig.2 Structural schematic diagram of the micro-lens array

根据设计参数的要求,取子眼的半口径 $a$ 为 0.25 mm,复眼的口径 $D$ 为 8.66 mm,微透镜阵列的角度为 $120^\circ$ ,根据几何关系可知,复眼所在的球壳基底的曲率半径 $R = 5$  mm,由公式得出 $\Delta\varphi = 5.72^\circ$ ,取子透镜视场角 $\Delta\theta = 6^\circ$ 。

常见的生物复眼类似于正透镜,设置子眼前后表面的曲率半径为 $r_1 = -r_2, r_1 > 0$ 。为保证复眼结构的小型化,设定子眼焦距 $f'$ 为 0.93 mm,子眼厚度 $d$ 为 0.35 mm。子眼透镜的材料选择便于 3D 打印制造的 PMMA 光固化材料,其折射率为 1.4918,根据公式(2):

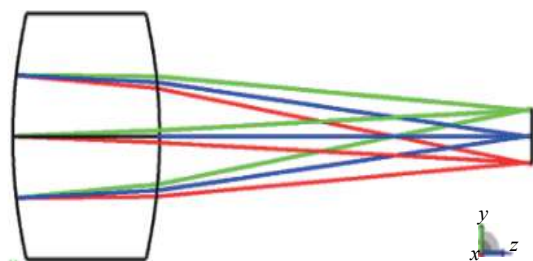
$$f' = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[n(r_2-r_1)+(n-1)d]} \quad (2)$$

可得到子眼的曲率半径为 $r_1 = 0.97$  mm,  $r_2 = -0.97$  mm。

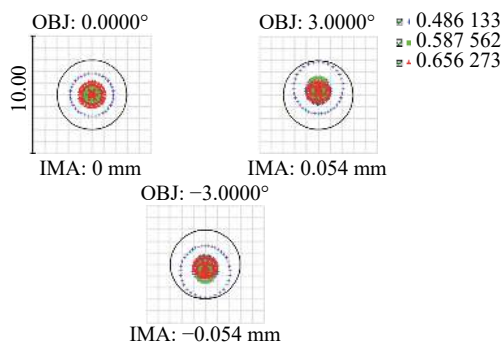
将上述计算得到的初始参数值输入 ZEMAX 软件中进行分析及优化,由于子眼的视场和口径均较小,像差也很小。优化后的子眼结构及成像质量如图 3 所示。

在 ZEMAX 中的非序列模式对曲面微透镜阵列进行建模,以中心子眼为对称中心,在三维空间内进行环形阵列,得到曲面微透镜阵列模型如图 4 所示。

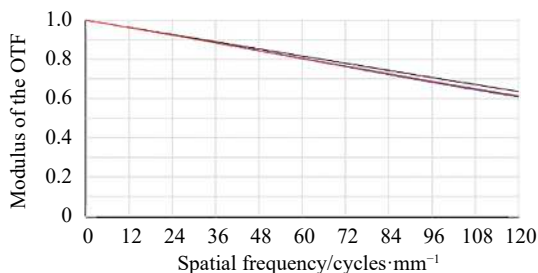
文中采用六边形子眼紧密拼接的结构形式,为避免相邻子眼之间的串扰现象,设置光阑阵列。光阑阵列位于曲面微透镜阵列和转像系统之间,且微透镜阵列到曲面像间的距离为 1.5 mm,即可确定光阑长度近似 1.5 mm。考虑 3D 打印的精度为 2  $\mu$ m,光阑内壁厚度为 0.05 mm。光阑孔与子眼一一对应且排列方式相



(a) 子眼透镜光路图  
(a) Light path diagram of micro-lens



(b) 子眼透镜的点列图  
(b) Spot diagram of micro-lens



(c) 子眼透镜的MTF曲线图  
(c) MTF curves of micro-lens

图 3 子眼的结构图及成像质量图

Fig.3 Structure diagram and image quality diagram of sub-eye

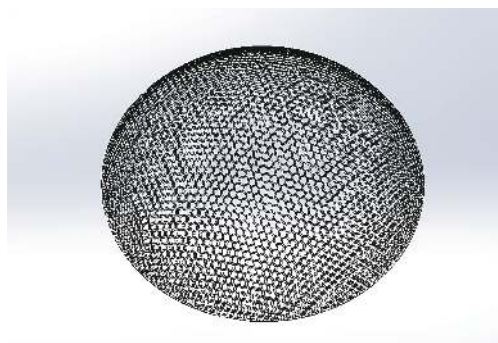


图 4 复眼模型

Fig.4 Compound eye model

同, 由于光阑是有一定斜率的通孔, 故将光阑设计为锥形结构。通过 ZEMAX 软件来确定光阑的参数, 每

个光阑采用相同的设计参数进行阵列, 光阑前端与子透镜后表面相对应, 其口径应略小于子眼口径, 考虑内壁厚度, 故将光阑前端口径设为 0.4 mm, 光阑后端口径大小应略大于子透镜的像面大小, 避免光阑对成像光束的干扰, 故将光阑后端口径设为 0.25 mm。该结构可作为视场光阑来限制子眼的成像区域, 能有效防止子眼间的成像串扰现象, 保证不同子眼透镜间的成像独立。

根据上述分析和计算, 通过 ZEMAX 软件对仿生复眼进行模拟, 选取曲面复眼的最大视场 (60°) 进行光线追迹, 因复眼结构是对称的, 所以列出中心子眼组、过渡子眼组和边缘子眼组, 每个子眼设置三个角度 (0°、3°、-3°) 的入射光线, 如图 5 所示, 加入光阑阵列后, 每个子眼有着特定的成像通道, 相互独立成像, 互不干扰。



图 5 光阑阵列结构图

Fig.5 Structure diagram of aperture array

### 3 转像系统设计

复眼系统需要在光阑阵列后添加转像系统, 将弯曲的像面转换为平面形式。转像系统的物面范围和半径不能小于微透镜阵列所成像的曲面半径, 保证光束经过不同子眼所成的像能够被转像系统全部接收<sup>[1]</sup>。转像系统位于微透镜阵列和接收系统之间, 曲面微透镜阵列所成的曲面像即作为转像系统的物面, 该面曲率半径为 3 mm。

选用 ZEBASE 中的一款具有大视场的光学系统作为转像系统的初始结构。该系统由八种材料组成, 总长度为 15.29 mm, 焦距为 1.23 mm, 视场角为 180°, 结构如图 6 所示。虽然该结构有着较大的视场, 但其筒长过大, 透镜材料不适用于 3D 打印, 且从图 7 中 MTF 曲线形态来看, 该系统初始结构的成像质量并不理想, 许多光学参数也均未满足项目指标要求。因此需要对该初始结构进行进一步优化。

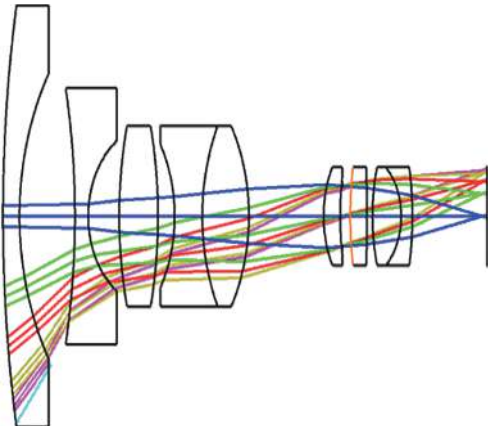


图 6 初始结构光路图

Fig.6 Light path diagram of initial structure

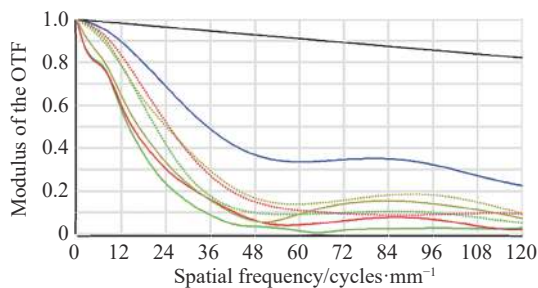


图 7 初始结构的 MTF 曲线图

Fig.7 MTF curve diagram of initial structure

该系统结构由 3D 打印技术进行制造,初始结构材料均是玻璃,无法作为 3D 打印的材料,为满足 3D 打印加工要求,需要对系统的材料进行替换。首先,将材料的折射率和阿贝数设为变量并优化至 1.492 和 57.44,将材料替换为 PMMA。其次,根据相应的设计指标要求,该初始结构长度偏大,将其缩小至原来的二分之一。由于转像系统的物面也是微透镜阵列的像面,应将初始结构的物面(无穷远)逐步优化至合理位置,并将其半径优化为 3 mm。在合理控制系统筒长的基础上,将物距优化为 1.2 mm,系统焦距为 1.44 mm。在优化过程中,观察该系统各个透镜的光焦度,将光焦度小、对光线偏折能力差的透镜进行合并或删除。将元件数量减少到四片,使结构更加紧凑,便于小型化、轻量化。最后,合理设置光阑位置,优化系统的整体结构,使其达到成像质量的要求。

系统像面由型号为 Sony ICX-618ALA 的四分之一 CCD 接收,该类型的 CCD 感光表面对角线的长度为 4.5 mm,像素尺寸大小为 5.6  $\mu\text{m}$  $\times$ 5.6  $\mu\text{m}$ 。根据奈奎斯特采样法计算出截止频率为 89.3 lp/mm。

优化后的转像系统成像光路如图 8 所示,转像系统由四片透镜组成,共轭距离为 6.5 mm。

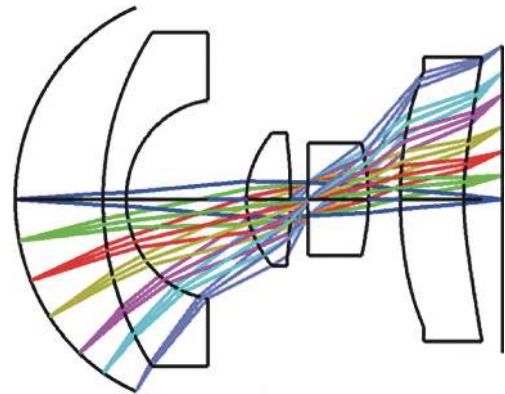


图 8 转像系统光路图

Fig.8 Light path diagram of the relay system

对于成像光学系统来说,光学传递函数能够客观且全面地反映出系统的成像质量<sup>[12]</sup>,如图 9 所示,在 90 lp/mm,各视场的 MTF 曲线值均大于 0.35,且曲线呈平滑趋势,满足该系统成像要求。

点列图中的点密集程度可以对光学系统的成像质量进行评估,同时也是常用像质评价方法之一<sup>[13]</sup>。如图 10 所示,各视场的 RMS 均方根半径均小于艾里

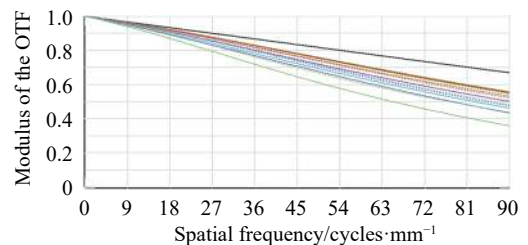


图 9 转换系统的 MTF 曲线图

Fig.9 MTF diagram of the conversion system

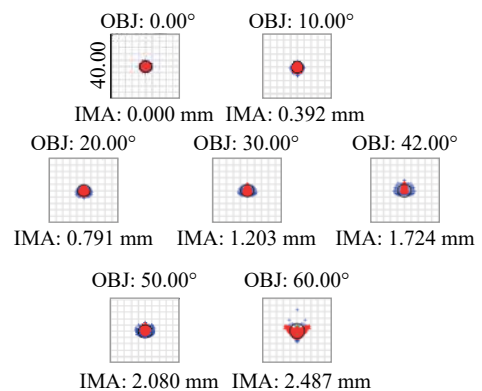


图 10 转换系统的点列图

Fig.10 Spot diagram of the conversion system

斑半径, 满足成像质量要求。

#### 4 复眼系统的组合

复眼系统由微透镜阵列、光阑阵列、转像系统组成。根据光学系统的光瞳衔接准则, 微透镜阵列的出瞳位置应与转像系统的入瞳位置相重合, 将光阑设置在转像系统第二片透镜的后表面上, 系统组合完成后其成像质量并不理想。考虑到子眼透镜口径和视场都很小, 对像差的影响也很小, 综合分析影响组合系统成像质量的最大因素是转像系统, 通过系统优化来平衡光阑移动给系统带来的像差影响。

优化完成后的组合复眼光路如图 11 所示, 利用多重结构给出七个视场 (0°、10.5°、21°、30°、40.3°、50°、60°) 的光路图, 整个系统长度为 8.7987 mm。

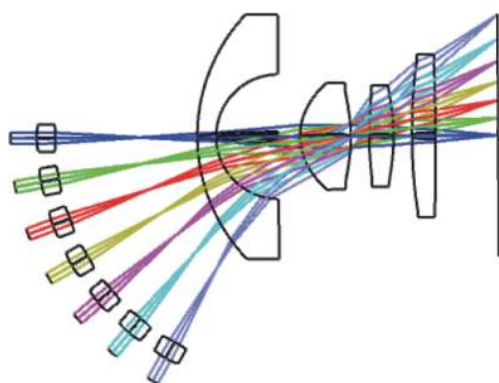


图 11 组合复眼系统的光路图

Fig.11 Light path diagram of the combined eye optical system

由于篇幅限制, 文中仅给出三个视场下 (0°、40°、60°) 的 MTF 曲线图, 如图 12 所示, 在 90 lp/mm 处, 三个视场的 MTF 分别大于 0.45、0.32、0.3, 该系统已达到成像质量要求。

三个视场 (0°、40°、60°) 的点列图如表 1 所示, 各个视场的 RMS 半径小于艾里斑半径, 且在探测器的像元尺寸范围内 (5.6 μm) 满足该系统的成像质量要求, 且无明显色差。

复眼系统由 S130 型的 3D 打印设备进行制作, 在透镜间设计柱状支撑结构, 用于固定透镜位置, 同时在打印过程中柱状结构有利于打印液的流出, 从而确保打印精度。为了避免杂散光对复眼成像的影响, 复眼结构的外壳均为遮光材料, “镜筒”、光阑由黑色树脂材料整体打印。以转像系统的光阑为分界, 前后两

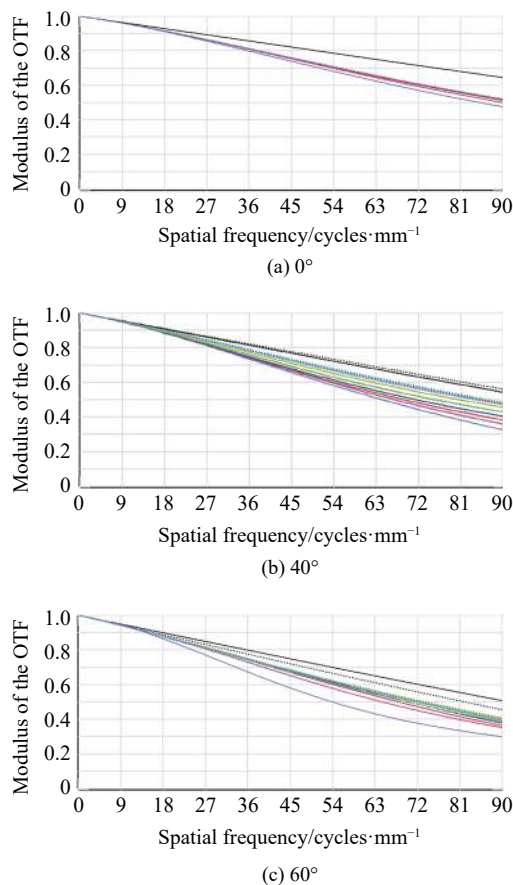


图 12 复眼系统不同视场的 MTF 曲线

Fig.12 MTF curves of compound eye system at different FOVs

部分分别进行打印, 镜片和镜筒之间通过垫片和压圈固定。光阑阵列由黑色树脂材料单独打印, 以柱状结构为支撑, 装配在复眼球壳后部, 复眼球壳及前后部分均以卡扣的形式安装在系统两侧。仿生复眼系统的结构图, 如图 13 所示。

文中对仿生复眼系统进行了公差分析, 保证复眼系统加工的可行性。3D 激光打印机的最高打印精度为 2 μm, 各公差参数设置范围如表 2 所示。选择“MTF 平均值”模式作为公差分析的评价方法, 采用灵敏度法和蒙特卡洛法对 1000 组镜头数据进行公差分析, 分析结果如表 3 所示。

可以看出, 系统 MTF 的名义值为 0.34854213。透镜在 98% 和 10% 时的 MTF 值分别大于 0.33633457 和 0.35235071。从以上数据可以看出, 公差分析后 MTF 值的变化量很小, 对仿生复眼系统的公差分析结果比较合理, 可以满足系统成像质量的要求。

表 1 不同视场的点列图

Tab.1 Spot diagrams of different fields of view

Angle	0°	40°	60°
0°			
RMS radius	2.283 μm	2.701 μm	2.939 μm
3°			
RMS radius	2.547 μm	2.678 μm	2.632 μm
-3°			
RMS radius	2.541 μm	3.172 μm	4.156 μm
Airy radius	4.365 μm	4.732 μm	5.034 μm

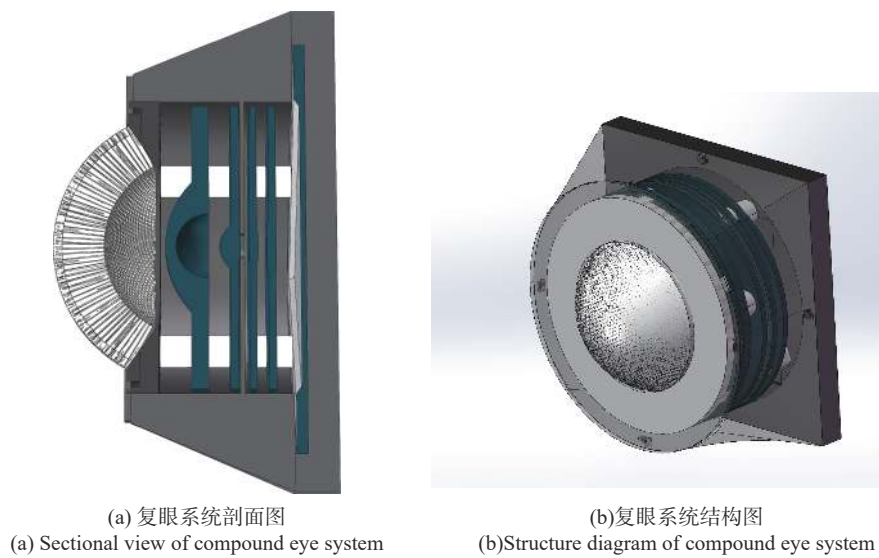


图 13 复眼系统模型

Fig.13 Model of compound eye system

表 2 公差参数范围

Tab.2 Tolerance parameter range

Sort	Data
Radius/mm	0.002
Thickness/mm	0.002
Surface decenter/mm	0.002
Surface tilt	0.03°
Element decenter	0.01
Element tilt	0.03
Abbe	0.5%
Index	0.001

表 3 复眼系统公差分析结果

Tab.3 Tolerance analysis results of compound eye system

Name	Result
Number of Monte Carlo	1 000
MTF nominal value	0.348 542 13
MTF average	0.347 187 12
98% lens MTF value	>0.336 334 57
80% lens MTF value	>0.343 335 32
50% lens MTF value	>0.348 132 40
20% lens MTF value	>0.351 250 35
10% lens MTF value	>0.352 350 71
2% lens MTF value	>0.353 558 39

## 5 结 论

文中设计了一款基于六边形子眼紧密拼接结构的仿生复眼系统,总长度为 8.7987 mm,视场为 121°,单个子眼透镜的通光口径为 500 μm,视场角为 6°。曲面微透镜阵列采用正六边形紧密拼接的方式进行排布,提高了球壳基底的空间利用率的同时增大了光能利用率。加入光阑阵列,有效防止子眼间的成像串扰。通过设计转像系统,将曲面微透镜阵列所成的焦曲面像转换为平面像,优化完成后,复眼系统的全视场 MTF 值均大于 0.3, RMS 半径均在艾里斑半径内。在公差分析之后,设计的复眼系统满足成像要求。该系统光学性能良好,结构紧凑利于小型化、轻量化,在医疗检测、航空航天、军事方面等领域有着广泛的应用潜力。

## 参考文献:

- [1] Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, Wang Ruiting, et al. Study on curved compound eye imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 346-350. (in Chinese)
- [2] Lei Weining, Guo Yunzhi, Gao Tingting. Study on the structure of large field view detection system based on bionic compound eye [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2016, 14(3): 62-66. (in Chinese)
- [3] Tian Yuqi, Gao Tianyuan, Zhao Yu, et al. Angle error of bionic compound eye imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0310001. (in Chinese)
- [4] Tan Xuechun, Wu Zhichao, Liang Zhu. Design and experiment of artificial compound eye receiving system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 992-997. (in Chinese)
- [5] Zou Chenggang. Optical design and simulation of the artificial compound eyes [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
- [6] Cao Axiu, Pang Hui, Zhang Man. et al. Design and fabrication of an artificial compound eye for multi-Spectral imaging [J]. *Micromachines*, 2019, 10(3): 208-218.
- [7] Thiele S, Araenbacher K, Gissibl T, et al. 3D-printed eagle eye: Compound micro lens system for foveated imaging [J]. *Science Advances*, 2017, 3(2): e1602655.
- [8] Floreano Dario, Pericet-Camara Ramon, Viollet Stéphane, et al. Miniature curved artificial compound eyes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(23): 9267-9272.
- [9] Li Zhengwen, Wang Yu, Xiao Jianliang. Mechanics of bioinspired imaging systems [J]. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, 2016, 6(1): 11-20.
- [10] Hu Xulei, Gao Ming, Chen Yang. Design of curved bionic compound eye optical system with large field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0114002. (in Chinese)
- [11] Cao Zhaolou, Zhan Zhenxian, Wang Keyi. Structural design of spherical compound eye lens for moving object detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 70-73. (in Chinese)
- [12] Fu Yuegang, Zhao Yu, Liu Zhiying, et al. Design of compact bionic compound eye optical system used for target identification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0602001. (in Chinese)
- [13] Cheng Hongtao, Wu Yuchong, Lu Jie, et al. Design of hyper-field zoom bionic eye optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0818004. (in Chinese)





第一作者简介：苏鹏程 (1995-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计等方面的研究。



导师 (通讯作者) 简介：陈宇 (1978-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学系统设计、图像处理及机器视觉等方面的研究。曾获省部级科学技术进步二等奖 1 项、三等奖 1 项。