

大视场并列型仿生复眼光学系统

张家铭, 陈宇, 覃海棋, 刘传志

引用本文:

张家铭, 陈宇, 覃海棋, 等. 大视场并列型仿生复眼光学系统[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5): 1012–1018.

ZHANG Jia-ming, CHEN Yu, TAN Hai-qi, et al. Optical system of bionic compound eye with large field of view[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1012–1018.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.1012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于微端面光纤面板的多孔径视场重叠复眼的视场模型

FOV modeling of multi-aperture superposition compound eye based on micro-surface fiber faceplate
光学精密工程. 2015, 23(11): 3018–3025 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152311.3018>

多孔径大视角仿生复眼成像系统

Multi-aperture and large field imaging experimental system based on artificial compound eyes
光学精密工程. 2017, 25(10s): 72–80 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172513.0072>

大面积发散太阳模拟器的均匀照明

Uniform illumination method for large-area divergent solar simulators
光学精密工程. 2019, 27(3): 552–560 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192703.0552>

星载空间目标监视衍射光学成像系统设计

Refractive-diffractive optical imaging system for satellite-borne surveillance of space targets
光学精密工程. 2017, 25(12z): 24–31 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172514.0024>

分孔径三视场中波红外光学系统

MWIR optical system with dual-optical aperture and three fields of view
光学精密工程. 2017, 25(7): 1757–1763 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172507.1757>

文章编号 1004-924X(2020)05-1012-07

大视场并列型仿生复眼光学系统

张家铭¹, 陈 宇^{1*}, 覃海棋², 刘传志²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 生命科学技术学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了实现大视场微型仿生复眼系统的增材制造, 对仿生复眼的成像原理、微透镜阵列与中继系统的设计以及复眼系统的机械结构进行了研究。根据仿生复眼的光学原理设计出单个微透镜, 并完成微透镜阵列。通过设计中继系统, 使曲面阵列所成的曲面像转换成平面像, 从而被平面探测器接收。将微透镜阵列与中继系统组合并对其进行优化。为了满足复眼系统 3D 增材制造工艺, 对其机械结构进行设计。整个复眼系由 3 481 个紧密拼接的正六边形微透镜组成, 每个微透镜的视场为 4° , 通光口径为 $110 \mu\text{m}$, 整个复眼的视场为 123.7° 。在 120 lp/mm 处, 复眼各视场的 MTF 值均大于 0.3, 各视场点列图 RMS 半径均小于艾里斑半径。该系统成像质量良好, 公差分析结果表明其像质满足成像要求, 满足增材制备工艺需求。

关键词: 光学系统设计; 微透镜阵列; 仿生复眼系统; 多孔径系统

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202805.1012

Optical system of bionic compound eye with large field of view

ZHANG Jia-ming¹, CHEN Yu^{1*}, TAN Hai-qi², LIU Chuan-zhi²

(1. *The School of Electro-Optical Engineering,*

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. *The School of Life Science and Technology,*

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

** Corresponding author, E-mail: 323111501@qq.com*

Abstract: Compound eyes are composed of several sub-eyes distributed on a curved surface. Such a vision system has several advantages, such as a small size, large Field of View (FOV), and high sensitivity, in addition to excellent application prospects in relevant fields of mechanical vision. To realize the additive manufacturing of a bionic compound eye system with a large FOV, the imaging principle of bionic compound eyes, design of a micro-lens array and relay system, and mechanical structure were studied. First, a single micro-lens was designed based on the optical principle of bionic compound eyes, and a micro-lens array was completed. Further, the curved image surface formed by the curved array was converted to a planar image, which could be received by a planar detector, by introducing a relay system. Subsequently, the micro-lens array and the relay system were combined, and the image quality was optimized. Finally, the mechanical structure was designed aiming at the

收稿日期: 2019-11-19; 修订日期: 2019-12-16.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2018YBF1105400)

additive manufacture of the compound eye system. The micro-lens array contains 3 481 closely-spliced hexagonal micro-lenses. Each lens has a FOV of 4° and a clear aperture of $110 \mu\text{m}$, and the entire compound eye covered an FOV of 123.7° . The MTF values of each FOV are greater than 0.3 at 120 lp/mm, and the corresponding RMS spot radii are less than the radius of the Airy disk. The analysis results indicate that the compound eye with a require image quality can meet addictive manufacturing requirements.

Key words: optical system design; micro-lens array; bionic compound eye system; multi-aperture system

1 引言

自然界中的大多数昆虫拥有复眼。复眼属于多孔径系统,由多个子眼构成,子眼紧密地排列在一起,并分布在球面或椭球面上。复眼最外层为角膜透镜,呈正六边形向外凸起,起保护和透光的作用^[1]。在角膜下方为晶锥,起到屈光的作用,它的形状可以随着光的强弱进行改变,在明亮环境下,晶锥会变得细长,从而减少通光量;在黑暗环境下,晶锥会变宽,从而增加光通量。角膜透镜和晶锥一起组成了复眼的屈光器。每个晶锥下都连着各自的感杆束,感杆束表面的折射率很高,起传导光线的作用,使神经细胞可以接收到外界的光线。

仿生复眼系统设计从平面复眼逐渐发展到现在的曲面复眼。由美国艾伦(Allen)领导的团队利用3层复式结构制作出复眼,微透镜的通光口径达到 $500 \mu\text{m}$,整个系统的视场角为 87° 且均方根(RMS)半径为 $10.876 \mu\text{m}$,3层结构的对准和组装难度高,且整个系统的像质不佳,视场较小^[2]。史成勇等人采用有间隔的圆形微透镜阵列,通过由7个透镜组成的中继系统,将曲面像转换成平面像,该系统的视场角为 122.4° ,单个微透镜的通光口径为 $500 \mu\text{m}$,但其整体结构结构依旧较为复杂^[3]。邓华夏等人在紧密拼接平面微透镜阵列的前部增加了一个折反射式系统,从而将系统的视场扩展至 90.7° (微透镜的直径为 4 mm),但整个复眼系统的尺寸为 $230 \text{ mm} \times 107 \text{ mm} \times 145 \text{ mm}$ ^[4]。

本文设计了一款大视场小尺度仿生复眼结构,它由曲面微透镜阵列和中继系统组成,具有较高的成像质量^[3]。其中,曲面微透镜阵列采用正六边形紧密拼接的方式,极大地提高了系统分辨

率,结构紧凑,更接近生物复眼结构;中继系统由4片透镜组成,结构简单,像质和光学参数均达到了指标要求。

2 微透镜的设计及阵列

本文以瓢虫复眼显微结构为基本研究对象,通过扫描电子显微镜观察,其结构如图1所示。从图1中可以看出,瓢虫复眼中的子眼结构为六边形,子眼间为紧密拼接形式^[5]。大视场人造仿生复眼的设计参数如表1所示。

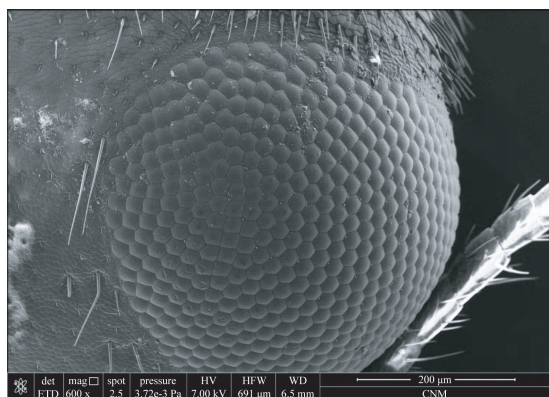


图1 瓢虫复眼微观结构

Fig. 1 Microstructure of ladybug's compound eye

表1 仿生复眼的光学设计参数

Tab. 1 Optical design prescription of bionic compound eye

设计参数	指标要求
复眼视场角/ $^\circ$	≥ 120
球冠状复眼直径/mm	5~10
微透镜的通光口径/mm	≤ 0.15
波段	可见光
筒长/mm	< 7

参照昆虫复眼,采用正六边形的微透镜组成阵列,形成“蜂窝”结构,从中心以“六边形”形式向外扩展^[6]。该阵列方式可有效提高复眼的空间利用率,使复眼结构小型化。

为了获得物空间的完整图像,相邻微透镜之间需要满足一定比例的视场重叠,以便进行图像拼接,即微透镜的视场角 $\Delta\varphi$ 需大于两相邻微透镜光轴间的夹角 $\Delta\theta$ 。但是过度的视场重叠也会妨碍复眼系统光学性能的提升^[7],因此需满足:

$$\Delta\theta < \Delta\varphi < 2\Delta\theta. \quad (1)$$

仿生复眼结构如图 2 所示,从图 2 中的几何关系可以得出:

$$\Delta\theta = \arctan \frac{2a}{R}, \quad (2)$$

其中: R 为透镜阵列所在球面基底的曲率半径, $\Delta\theta$ 为相邻两微透镜光轴间的夹角, a 是单个微透镜的半口径。

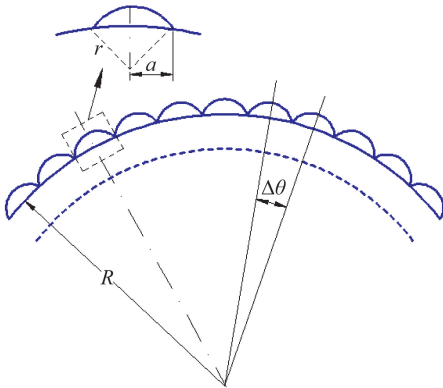


图 2 仿生复眼微透镜阵列结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of micro-lens array for bionic compound eye

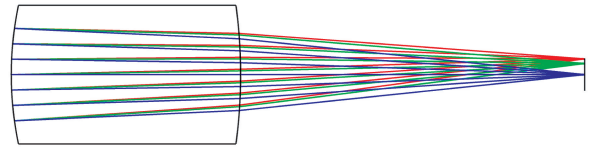
根据光学设计指标,取微透镜的通光口径为 0.11 mm,则正六边形微透镜半口径 $a = 55 \mu\text{m}$;取球冠状复眼的口径为 5.2 mm,微透镜阵列的角度为 120° ,通过几何关系可计算出微透镜阵列所在基底的曲率半径 $R = 3 \text{ mm}$ 。由式(2)可得出 $\Delta\theta = 2.1^\circ$,那么有: $2.1^\circ < \Delta\varphi < 4.2^\circ$,取 $\Delta\varphi = 4^\circ$ 。

鉴于系统结构紧凑,将微透镜的焦距 f' 设定为 0.5 mm,透镜厚度 d 取 0.2 mm,透镜材料为 PMMA 光固化材料,其折射率 $n = 1.4918$ 。设微透镜前后表面的初始曲率半径满足 $r_1 = -r_2$,且 $r_1 > 0$ 。根据公式:

$$f' = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[n(r_2-r_1)+(n-1)d]}. \quad (3)$$

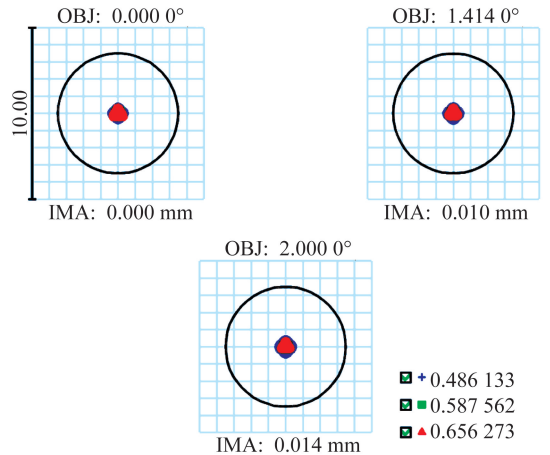
可求出微透镜的曲率半径: $r_1 = 0.4563 \text{ mm}$, $r_2 = -0.4563 \text{ mm}$ ^[8]。

将此结构输入到 Zemax 中对其像质进行优化,并将视场逐步扩大到 4° 。优化完成后,其像距是 0.3 mm。由于微透镜的口径及视场均很小,因此其像差也极小,优化后的微透镜结构及其成像质量如图 3 所示。



(a)微透镜光路

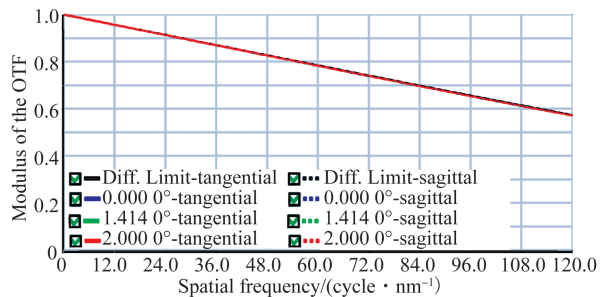
(a) Structure of micro-lens



Units are μm Airy radius: 3.499 μm
 Field: 1 2 3
 RMS radius: 0.220 0.217 0.216
 GEO radius: 0.382 0.414 0.443
 Scale bar: 10 Reference: chief ray

(b)点列图

(b) Spot diagram



(c)调制传递函数曲线

(c) MTF curves

图 3 微透镜结构和像质

Fig.3 Layout and image quality of micro-lens array

应用 Solidworks 软件,将微透镜阵列生成半径为 3 mm 的球形冠状结构,如图 4 所示。所有微透镜具有相同的结构参数和光学性能^[9]。整个复眼的全视场角由下式给出:

$$\omega = n\Delta\theta + \Delta\varphi, \quad (4)$$

式中 n 是沿主阵列方向阵列透镜的个数。由于相邻微透镜间夹角 $\Delta\theta$ 为 2.1° 且阵列角度为 120° ,经计算 $n = 120^\circ / 2.1^\circ = 57.14$,取 $n = 57$,由式(4)可以确定复眼系统的全视场角为 123.7° 。

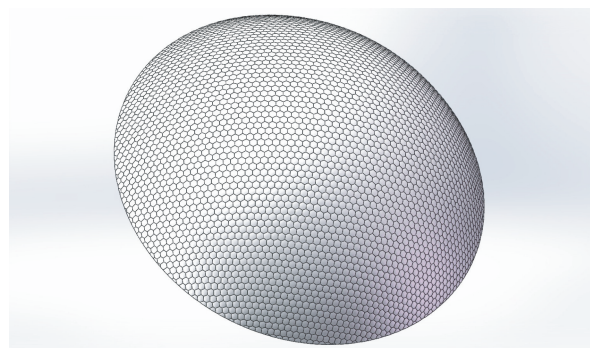


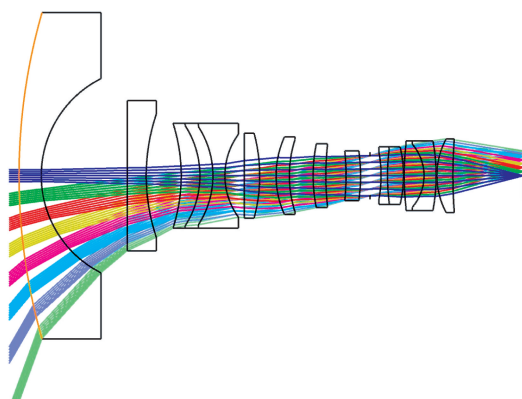
图 4 微透镜阵列结构图

Fig. 4 Micro-lens structural array

3 中继系统设计

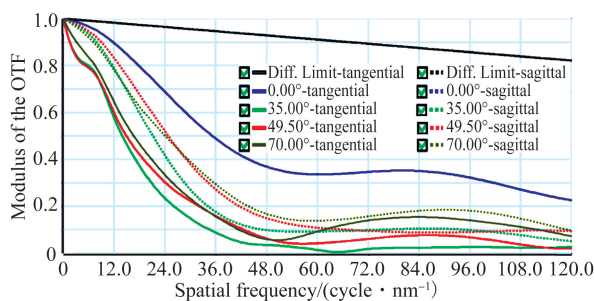
系统像面由型号为 OV7660 的 5.1 mm (1/5 inch)平面 CMOS 接收。为了使微透镜阵列所成的曲面像转换为平面像,在透镜和接收系统之间设计中继系统。微透镜阵列的前表面到其所成的曲面像之间的距离是 0.5 mm,其基底的曲率半径为 3 mm,可以确定微透镜阵列所成像面的曲率半径为 2.5 mm,该像面也同时作为中继系统的物面。

选择 ZEBASE 中编号为 F_007 的广角镜头作为中继系统的初始结构,如图 5(a)所示。系统的总长度为 416 mm,焦距为 19.216 mm,视场角为 140° 。整个系统共采用 8 种材料,为适用于 3D 打印,将所有透镜材料均更改为 PMMA,系统设计具有一定难度^[10]。该系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线如图 5(b)所示,由图可知,该系统像质较差,需进一步优化。



(a) 中继系统初始结构

(a) Structure of initial relay system



(b) 中继系统初始结构的 MTF 曲线

(b) MTF curves of initial relay system

图 5 中继系统的初始结构和像质

Fig. 5 Initial structure and image quality of relay system

首先,考虑到筒长的要求,将初始系统缩放到原来的 1/50 倍。将物体距离从无穷远改为有限距离,然后优化中继系统。在保持足够好的成像质量的同时,将物距逐渐减小至 2.5 mm 以内,使共轭距离控制在 6.5 mm 以内。其次,将透镜材料修改为折射率和阿贝数的组合形式,并设为变量,并逐步优化到材料 PMMA 所对应的数据上,即 1.4918 和 57.44。在此过程中,系统的 3 个胶合透镜转换为 3 个单透镜,所有材料的类型重新恢复为 PMMA。

在逐步优化的过程中,发现有些透镜的光焦度极小,对像质影响也不大,便可直接将它们去掉再进行优化。而有些相邻透镜的相邻面曲率半径近似相等,便可通过将空气间隔优化到 0 从而形成一个单透镜。最后透镜的结构由 4 片透镜组成,物像共轭距为 5.384 mm。为更好地平衡残余像差,将光阑面移至第三透镜的前表面,形成如图 6 所示的中继系统外形结构。优化后整个中继系统的长度为 4.348 mm^[11]。

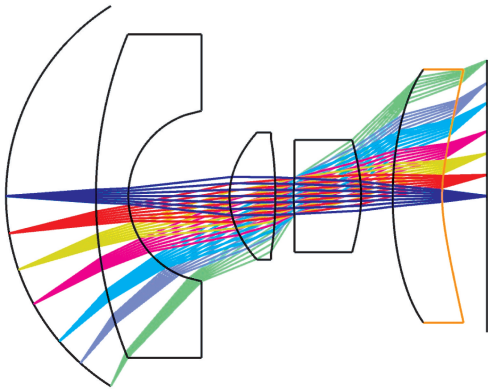


图 6 结构优化后的中继系统

Fig. 6 Schematic diagram of optimized relay system

型号为 OV7660 的 CMOS 感光面的半对角线长度约为 1.7 mm, 像素尺寸为 $4.2 \mu\text{m} \times 4.2 \mu\text{m}$ ^[12]。截止频率的计算公式为^[12]：

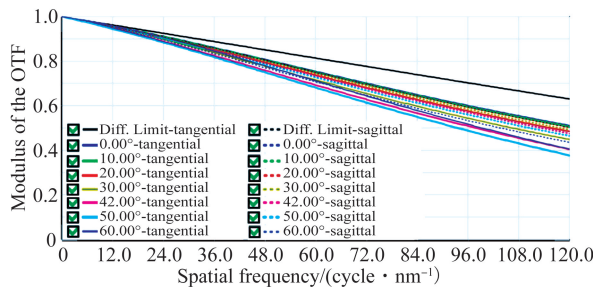
$$N = \frac{1\ 000\ \mu\text{m}}{2\alpha} = \frac{1\ 000\ \mu\text{m}}{2 \times 4.2\ \mu\text{m}} = 120\ \text{lp/mm}, \quad (5)$$

其中 α 为像元尺寸。

系统优化后, 各视场 MTF 曲线如图 7(a) 所示, 点列图如图 7(b) 所示。

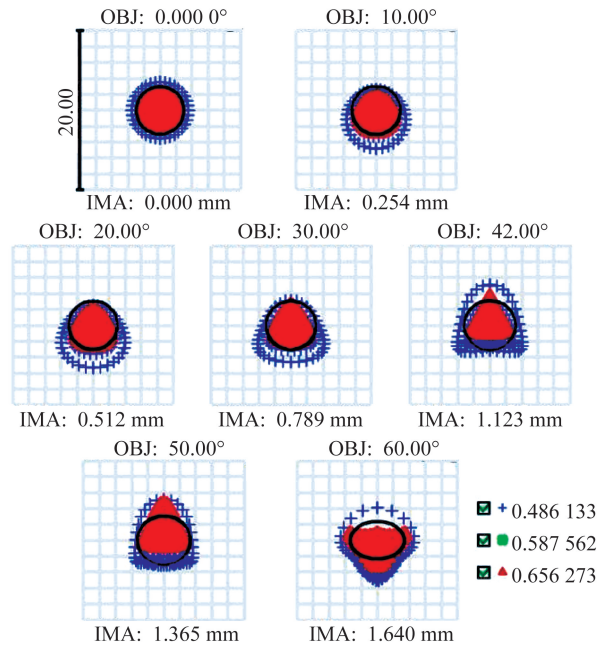
MTF 是综合体现成像光学系统成像质量的关键指标。由图 7(a) 可以看出, 在 120 lp/mm 处, 各视场的 MTF 值都大于 0.35, 且曲线平滑, 满足成像要求。

点列图中点的密集程度可以衡量系统的成像质量。如图 7(b) 所示, 镜头在不同视场下, 点列图 RMS 半径分别为 1.851, 1.880, 1.946, 2.021, 2.1, 2.165, 2.531 μm , 均小于艾里斑半径 2.855 μm , 成像质量较好。



(a) 优化后的 MTF 曲线

(a) Optimization results of MTF curves



Wide angle projection lens
2019/12/23
Units are μm Airy radius: 3.011 μm Legend items refer to wavelengths
Field: 1 2 3 4 5 6 7
RMS radius: 1.858 1.929 2.025 2.062 2.122 2.160 2.543
GEO radius: 3.552 4.821 5.338 5.102 5.106 5.147 5.051
Scale bar: 20 Reference: chief ray

(b) 优化后的点列图

(b) Optimization results of spot diagram

图 7 中继系统的优化结果

Fig. 7 Optimization results of relay system

4 复眼光学系统的组合

复眼系统由微透镜阵列和中继系统组成。根据光瞳衔接原则, 微透镜阵列的出瞳应与中继系统的入瞳相重合^[13]。但由于每个微透镜的口径与视场均很小, 因此, 微透镜的像差也很小。微透镜阵列与中继系统组合后, 其系统像差主要由后者决定。将系统光阑设置在复眼系统的第 7 个表面上(原中继系统光阑位置), 通过优化系统来平衡微透镜阵列由于光阑移动而产生的像差。

优化后组合系统的成像光路如图 8 所示。利用多重结构设置, 在图中给出了 7 个视场下 ($0^\circ, 10.5^\circ, 21^\circ, 31.5^\circ, 39.9^\circ, 50.4^\circ, 58.8^\circ$) 微透镜的成像光路。整个复眼系统的总长度约为 6.65 mm。

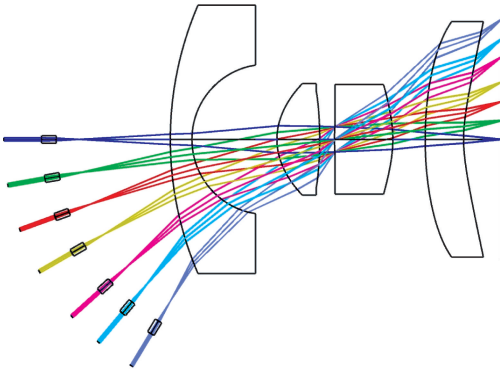
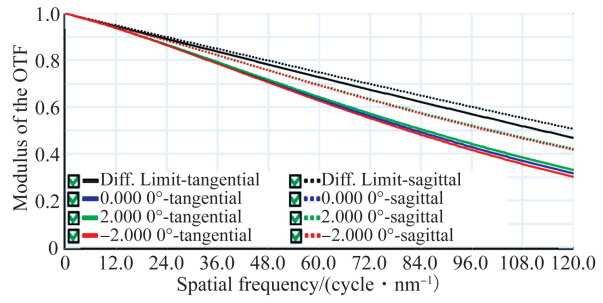


图 8 复眼光学系统的成像光路

Fig. 8 Optical path of compound eye system

由于篇幅所限,下面仅给出 $0^\circ, 39.9^\circ, 58.8^\circ$ 三个组态微透镜的 MTF 曲线,如图 9 所示。可以看出,在 120 lp/mm 频率处, $0^\circ, 39.9^\circ, 58.8^\circ$ 视场分别大于 $0.45, 0.35, 0.3$,表明该系统具有较高的成像质量。

畸变随视场的增大而增大,因此对于复眼系统,其最大畸变由视场为 58.8° 的微透镜所决定。由于篇幅所限,下面仅给出该视场下微透镜的畸变曲线,如图 10 所示。从图中可以看出,最大相对畸变小于 0.5% 。



(c) 58.8°

图 9 复眼系统不同视场的 MTF 曲线

Fig. 9 MTF curves of compound eye system at different FOVs

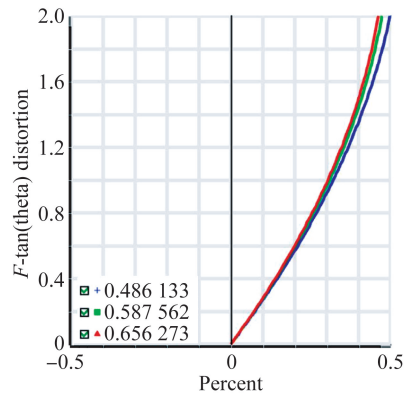
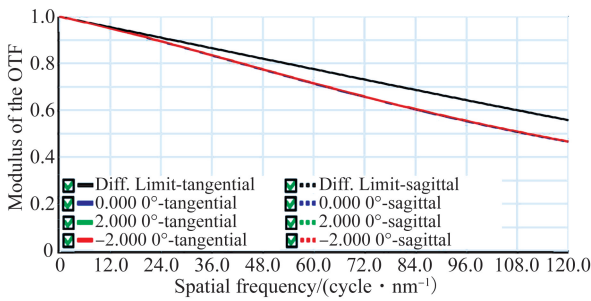
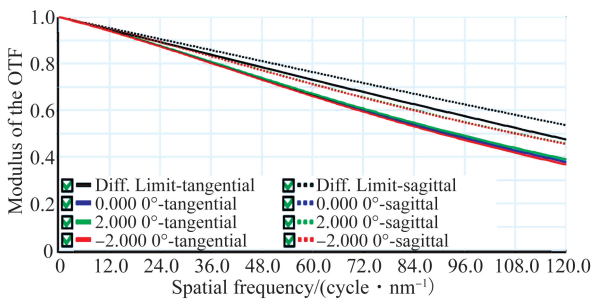


图 10 视场为 58.8° 时复眼系统的畸变

Fig. 10 Distortion of compound eye system at FOV of 58.8°



(a) 0°



(b) 39.9°

复眼各视场的几何图像分析结果如图 11 所示。由“F”的几何图像分析结果可以看出,复眼系统可以在全视场范围内清晰成像^[14]。

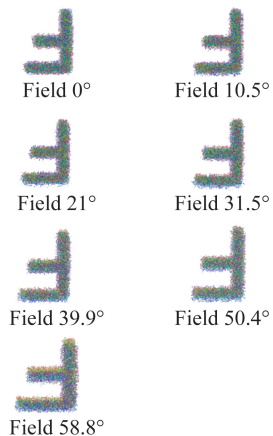


图 11 字母“F”的复眼成像结果

Fig. 11 Images of letter “F” captured by compound eye

在全视场范围内,复眼系统中,各采样微透镜各视场的点列图如图 12 所示(彩图见期刊电子版),其 RMS 半径均小于艾里斑的半径(3.697 μm)和探测器的像元尺寸(4.2 μm)。从图中可以看出,复眼系统各个视场均无明显色差。

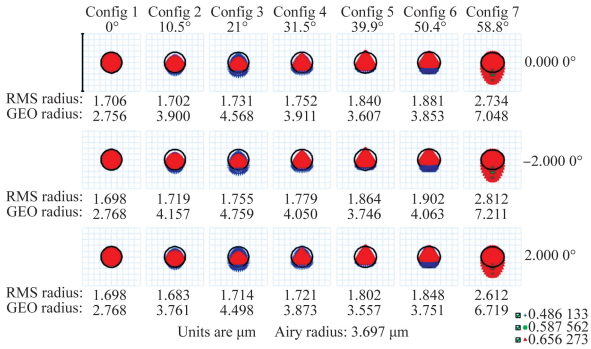


图 12 复眼系统点列图

Fig. 12 Spot diagram of compound eye system

景深在成像系统中也起着重要的作用,远景深度 Δ_1 和近景深度 Δ_2 分别为:

$$\Delta_1 = \frac{p^2 z'}{2af' - pz'}, \quad (6)$$

$$\Delta_2 = \frac{p^2 z'}{2af' + pz'}, \quad (7)$$

其中: p 为对准平面到入射光瞳的距离, z' 为允许弥散斑的尺寸, $2a$ 为系统的入瞳直径, f' 为该光学系统的焦距。由于复眼系统对无穷处物体成像,因此其近景平面的位置 P_2 为:

$$P_2 = \frac{2af'}{z'}. \quad (8)$$

复眼系统的入瞳直径 $2a = 0.045 \text{ mm}$, 焦距 $f' = 0.24 \text{ mm}$, 允许弥散斑的大小为光电探测器的像元尺寸, 即 $z' = 4.2 \mu\text{m}$, 可得近景距离 $P_2 = 2.6 \text{ mm}$, 复眼系统的景深范围从 2.6 mm 到无穷远。

针对 3D 增材制造工艺, 需利用 Solidworks 对系统的支撑结构进行设计。这里采用柱状支撑, 可以在打印过程中方便打印液的流出, 保障打印精度, 如图 13 所示^[15]。复眼系统的光阑, 除中心透光孔外, 其余部分均为遮光部分。为避免复眼侧面产生杂散光, 复眼系统的外壁也应为遮光材料。因此, 采用黑色树脂材料对复眼“镜筒”与光阑进行一体化设计。光阑前后的透镜组分别进行 3D 打印后, 再利用隔圈和压圈的方式固定在光阑两侧。整体结构如图 14 所示。

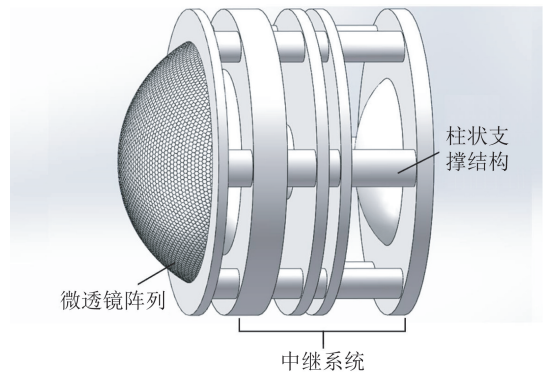


图 13 复眼系统的柱状支撑结构

Fig. 13 Cylindrical support structure of compound eye system

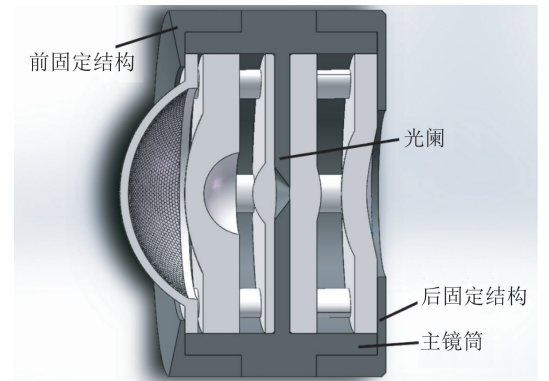


图 14 复眼系统的机械结构

Fig. 14 Mechanical structure of compound eye system

为了确保设计出的复眼系统具有可加工性, 需要对整个复眼系统进行公差分析。整个复眼系统采用 3D 打印的方法进行制造, 型号为 S130 的 3D 激光打印设备的打印精度为 2 μm , 公差范围由表 2 给出。选择“MTF 平均值”模式作为公差分析的成像标准。采用灵敏度和蒙特卡洛法分析 1 000 组镜头数据, 分析结果如表 3 所示。

表 2 复眼系统制造的公差范围

Tab. 2 Tolerance range in fabrication of compound eye system

参数	规格
曲率半径/mm	0.002
厚度/mm	0.002
表面偏心/mm	0.002
表面倾斜/(°)	0.03
元件偏心/mm	0.01
元件倾斜/(°)	0.03
折射率	0.001
阿贝数/%	0.5

表 3 1 000 组公差分析结果

Tab. 3 Tolerance analysis result of 1 000 groups of lens data

数 据	结 果
蒙特卡罗模拟次数	1 000
名义 MTF 值	0.354 907 53
平均 MTF 值	0.353 884 90
98%的镜头 MTF 值	优于 0.344 944 52
80%的镜头 MTF 值	优于 0.350 516 96
50%的镜头 MTF 值	优于 0.354 301 10
20%的镜头 MTF 值	优于 0.357 450 55
10%的镜头 MTF 值	优于 0.358 977 93
2%的镜头 MTF 值	优于 0.360 951 23

从表 3 可以看出,系统 MTF 的名义值为 0.354 907 53,且 98%和 10%的镜头 MTF 值分

别大于 0.344 944 52 和 0.358 977 93。从以上数据可知,经公差分析后 MTF 值的改变量较小,满足像质要求。

5 结 论

本文设计了一款大视场小尺度仿生复眼光学系统,其视场为 123.7° ,总长度为 6.65 mm,单个微透镜的通光口径为 0.11 mm,视场角为 $\pm 2^\circ$ 。采用正六边形紧密拼接的方式进行排布,提高了空间利用率。通过引入中继系统,将微透镜阵列所形成的焦曲面像转换为平面像,复眼系统全视场的 MTF 值均大于 0.3。在公差分析之后,设计的复眼系统满足成像要求。该复眼系统结构紧凑且具有大视场和高像质的特点,在机器视觉和目标识别等领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] CHENG Y, CAO J, ZHANG Y K, *et al.*. Review of state-of-the-art artificial compound eye imaging systems [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(3): 031002.
- [2] ZHANG H, LI L, MCCRAY D L, *et al.*. Development of a low cost high precision three-layer 3D artificial compound eye [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22232-22245.
- [3] SHI C Y, WANG Y Y, LIU C Y, *et al.*. SCECam: a spherical compound eye camera for fast location and recognition of objects at a large field of view [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32333-32345.
- [4] DENG H X, GAO X C, MA M C, *et al.*. Cateadioptric planar compound eye with large field of view [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12455-12468.
- [5] BORST A. Drosophila's view on insect vision [J]. *Current Biology*, 2009, 19(1): R36-R47.
- [6] CHEN M J, CHU X, CHUN Y W, *et al.*. Research on structural design and optimization of artificial optical compound eye [J]. *Materials Science Forum*, 2011; 817-821.
- [7] 谭雪春,武志超,梁柱. 仿生复眼接收系统设计与实验 [J]. *光学精密工程*, 2011,19(5): 992-997.
- TAN X CH, WU ZH CH, LIANG ZH. Design and experiment of artificial compound eye receiving system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 992-997. (in Chinese)
- [8] WU S D, JIANG T, ZHANG G X, *et al.*. Artificial compound eye: a survey of the state-of-the-art [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2017, 48(4): 573-603.
- [9] JIAN H J, HE J Z, JIN X Y, *et al.*. Automatic geometric calibration and three-dimensional detecting with an artificial compound eye [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(5): 1296-1301.
- [10] 耿国华,石晨晨,魏潇然,等. 3D 打印中的模型分割与打包 [J]. *光学精密工程*, 2016,24(6): 1439-1447.
- GENG G H, SHI CH CH, WEI X R, *et al.*. Model segmentation and packaging in 3D printing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1439-1447. (in Chinese)
- [11] KUO W K, KUO G F, LIN S, *et al.*. Fabrication and characterization of artificial miniaturized insect compound eyes for imaging [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(5): 056010.
- [12] 郑田莉,付威威,朱海龙. 角膜交联仪光学系统的设计与实现 [J]. *光学精密工程*, 2019,27(6): 1286-1292.
- ZHENG T L, FU W W, ZHU H L. Design and implementation of optical system for corneal cross-linking device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(6): 1286-1292. (in Chinese)
- [13] CAO Z L, ZHAI C J, WANG K Y. Design of ar-

tificial spherical superposition compound eye [J].
Optics Communications, 2015, 356: 218-222.

- [14] 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 Tech-*

nology Letters, 2017, 59(59): 1277-1279.

- [15] 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.

作者简介:



张家铭(1994—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从光学系统设计和机械视觉的研究与应用。E-mail: 394463508@qq.com

通讯作者:



陈宇(1978—),男,吉林长春人,博士,副教授,硕士生导师,2002年、2004年、2009年于长春理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,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。E-mail:323111501@qq.com