

文章编号 2095-1531(2014)06-0969-06

# 大视场曲面复眼光学系统设计

王晶<sup>1\*</sup>, 崔恩坤<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 本文通过结构性设计解决了曲面复眼光学系统边缘视场像质难以提高的问题。该光学系统由7个相互独立的子复眼光学系统组成, 各子复眼光学系统相互独立, 其光线相互交叉。在系统中引入自由曲面透镜, 自由曲面透镜相当于棱镜将微透镜阵列光线偏折, 使同一子系统的微透镜成像于平的像面上。每个子系统包括一层微透镜阵列, 一个自由曲面透镜, 一光阑阵列和后续像差校正镜。相比较于传统的复眼系统, 该结构对复眼边缘视场的像差校正能力更强, 能很大程度地提高边缘视场的像质。该系统的理论视场可达 $180^\circ$ , 制造精密要求不高且适用性强。本文最后通过光学软件zemax对光学系统进行了模拟验证, 证明其可实现性。

**关键词:** 光学设计; 曲面; 复眼; 自由曲面

**中图分类号:** TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20140706.0969

## Design of large FOV curved artificial compound eye with freeform lens

WANG Jing<sup>1\*</sup>, CUI En-kun<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of*

*Optical, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;*

*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: wangjingyxl@sina.com*

**Abstract:** This research demonstrated an innovative and integrated approach to design 3D compound eye optical structure which composed of seven sub-systems, and to improve image quality of marginal FOV. For every sub-system, it is an unattached optical system with cross light path, which consists of a microlens array layer, an aperture stop array, and integrating freeform lens which are used to make images of different microlens onto a plane image sensor. It's easier for this structure to get better image quality for marginal FOV by reducing the maximum light deviation angle. The theoretic FOV can be as large as  $180^\circ$ . In the meantime the requirement for fabricating accuracy is not very high. The feasibility of the proposed structure is validated with optical software.

**Key words:** optical design, curved surface, compound eyes, freeform lens

收稿日期: 2014-09-15; 修订日期: 2014-11-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2013AA122102)

## 1 引言

昆虫的复眼结构为由聚集在一起的一簇“小眼”所构成。在自然界中,昆虫复眼都是曲面的,通过排布在曲面上的小眼可以将整个视场分成若干部分,每个小眼对应一定的视场角,只负责观察视场中的一小部分。在每个小眼后面都有对应的视觉细胞,其作用相当于成像系统的探测器,每个小眼对外部空间所成的像在这里进行处理,将不同小眼的像接合在一起就形成了整个视场的完整像<sup>[1]</sup>。目前,复眼结构光学系统已经大量的运用于光学感应、机械视觉、智能机器人视觉系统。复眼光学系统不仅在航空领域具有很好的发展潜力,也可以应用到其他的军事领域,例如在飞行器前视红外探测、夜视设备以及预警卫星和战略与战术导弹等武器精确制导系统,并通过改进数字处理方法与结构的设计来实现诸如全视角成像、目标定位、3D 信息提取、指纹提取、彩色成像、多谱成像等拓展功能。人工复眼是一个集多学科于一体的学科,如生物学、光学、电子学、信息处理、数据融合等,已成为具有创新性、边缘性、交叉性的前沿研究领域。复眼系统的工作原理是通过排布在一个基底面上的许多微透镜进行光采集,以光探测器作为接收组件,且各光通道之间通过光隔离层分离,将获取的信息经计算机数字处理后达到目标重组成像。

自生物复眼结构被发现以来,研究者们已经对其结构功能进行了大量的研究,以期能设计出具有相同功能机制的人造光学系统,但受制于微光学加工工艺低、装调水平低、后期数据融合以及信息处理能力薄弱等各种因素,已有的人工复眼结构粗糙功能,与生物复眼相距甚大<sup>[2]</sup>。目前研究较多的复眼结构形式主要有平面型和曲面型,其中曲面型又可细分为单层和多层结构。平面型结构工艺简单,但边缘视场成像质量差,无法做成大视场,相对来说,曲面型则更有发展潜力。虽然人工仿生复眼的研究及应用仍存在许多亟待解决的问题,但其广阔的应用前景以及已取得的辉煌成果无时不在激励着科技人员的研发热情,因此

有巨大的提升空间。

本文设计得到了一种新型的曲面复眼结构,其由7个相互独立的子系统组成,成像视场角可达 $180^\circ$ ,并且具有更好的边缘成像。并讲述了子系统和整体复眼系统设计理念;并用光学设计软件上对所设计的光学系统进行模拟成像评价设计结果。

## 2 复眼光学系统设计

为了提高仿生复眼的视场角,研究人员提出了与生物复眼更加近似的曲面型仿生复眼透镜,曲面仿生复眼光学系统子眼通道排布在曲面基底上,各个子眼的分布要尽量有规则性,同时做到视场无盲区。规则性是为了追求工艺制作的简易,同时也为后续的探测器排布等给予更好的自由度。设计合理的微透镜阵列将视场进行分割,每个微透镜构成一个成像通道,对应于不同的视场角,其作用相当于一个小眼。使得整个阵列分别对视场的不同部分成像,从而对物空间特定的角度成像。如果各个微透镜的焦距相同,则各微透镜将成像于一个球面上,如图1所示。

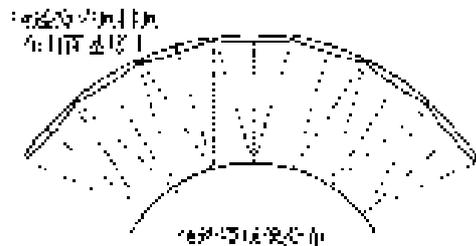


图1 曲面微透镜成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of imaging of curve substrate compound eyes system

由于目前的图像探测器均为平面结构,所以曲面复眼光学系统需要将各微透镜的像引到一个平面上,通常的曲面复眼光学系统的结构如图2所示。前者结构相对简单,但是边缘视场像差校正能力有限,像质差,后者视场能做到更大,但是结构复杂难以实现。曲面复眼透镜的微透镜阵列分布在曲面基底上,各微透镜的光轴与图像探测器间存在着一个夹角,越靠近曲面基底边缘的微

透镜,此夹角的角度越大,而此夹角的存在会使微透镜的成像质量降低,如果以微透镜中心视场清晰对焦,边缘视场就会出现不同程度的离焦,严重影响微透镜的成像质量,降低图像的清晰度,这两方面的原因使曲面仿生复眼很难进一步扩大视场角<sup>[3]</sup>。此外,曲面微透镜的加工是一个难点,因为单个微透镜的视场角很小,为了获得较大的视场角,曲面基底上微透镜的个数很多,这给系统加工带来了很大的困难。

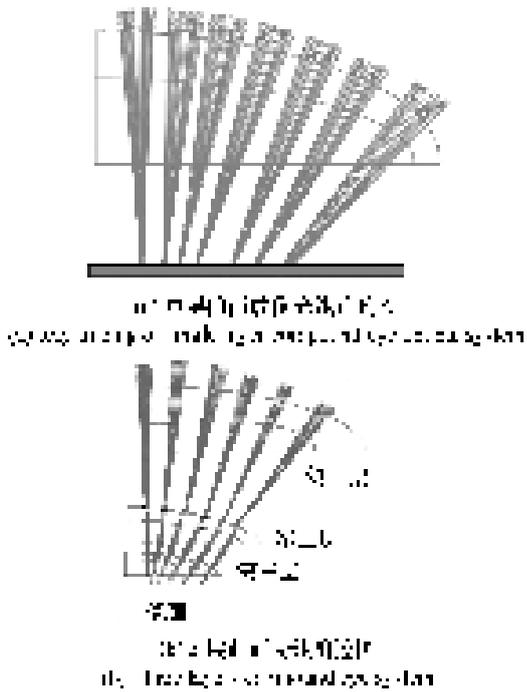


图2 曲面成像光线追迹图

Fig.2 Ray tracing of compound eye optical system

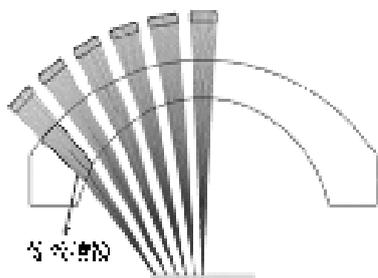


图3 复眼光学系统光线追击示意图

Fig.3 Schematic diagram of ray tracing of curved artificial compound eye

本文通过结构调整对曲面复眼光学系统进行了优化设计。在微透镜阵列后加一个自由曲面透

镜,如图4所示,每个微透镜的光线只利用整合透镜的一部分,因此其对于每个微透镜相当于棱镜,其对边缘微透镜的光线进行转折,使各微透镜无重叠的成像于平的像面上<sup>[4-9]</sup>。此外,用一整块透镜代替微透镜结构可以简化系统的结构。如前所述,边缘透镜的视场会有较大的倾斜,这造成边缘透镜中心视场两边的视场存在相反的离焦,视场越大这样的离焦越严重,为此需要通过微透镜的位置选择和整合透镜的面型来矫正由于边缘视场倾斜造成的离焦。根据微透镜的视场角和成像关系设计自由曲面整合透镜的形状参数,在此选择微透镜阵列的基底为非球面,通过对边缘视场的离焦情况计算圆锥系数。每个微透镜对物空间的特定角度成像,因此每个微透镜相对于中心微透镜的倾斜角度 $\theta$ 是一定的,如图4所示,根据以下关系计算各微透镜所在基底的曲率半径。



图4 0通道和1通道光学系统参数

Fig.4 Parameters of channel 0 and channel 1 optical systems

0通道的光程为:

$$L_0 = n_1 d_1 + d_{10} + R_0 + n_2 d_{20}, \tag{1}$$

1通道的光程为:

$$L_1 = n_1 d_1 + d_{11} + R_1 + n_2 d_{21}, \tag{2}$$

令  $\Delta l = L_0 - L_1$ , 得:

$$\Delta l = (d_{10} - d_{11}) + n_2 (d_{20} - d_{21}) + (R_0 - R_1), \tag{3}$$

式中: $n_1$ 和 $n_2$ 分别表示微透镜和自由曲面镜的的折射率, $d_{11}$ 和 $d_{10}$ 表示微透镜到自由曲面透镜的距离, $d_{20}$ 和 $d_{21}$ 表示各通道微透镜的厚度, $R_1$ 和 $R_0$ 表示自由曲面后镜面到像面的距离。已知0通道的排列情况和所选的玻璃就能计算得到每个通道的 $\Delta l$ ,即得到通道1的微透镜离球心的距离,通过差值方法求得曲面基底的圆锥系数。

微透镜在曲面基底的位置安放只能对小偏转

角的通道具有较好的校正像差效果,当复眼通道偏离中心通道较远时,各微透镜与光探测器所在平面的距离就会增大,对于通常所采用的均一微透镜阵列而言,位于视场中心和位于视场边缘的透镜受离焦作用的影响很难同时清晰对焦。此外位于边缘视场的微透镜光线需要转折的角度较大,这会带来严重的像差和色差,较难校正。因此通常的大视场复眼光学系统的边缘视场的像质较严重。

本文选择将大视场复眼光学系统拆分成若干个子系统,每个子系统对应单独的像面,如图5所示。

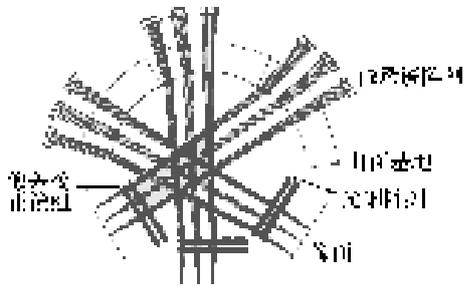


图5 复眼光学系统子午面光学结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the compound eye image system in tangential face

在子午面上,将均匀排列的微透镜阵列平均分成3组,每组有其对应的整合透镜、后校正镜组、和像面,微透镜光线经整合透镜,不同的子系统光线在球心处相交,然后分别进入对应的像差校正镜组成像于对应的子系统像面。此种方法可以很大程度地减小小边缘视场光线的转折角度,其要求整合透镜与后校正镜组之间的距离要足够大,为了使其有足够的距离,并且缩小每个通道的像面,该系统用来设计较小的焦距的光学系统。

通过该方法每个子眼系统的视场角可以较小,而且曲面基底上的微透镜排列不会很密集,加工精度要求也不是很高,工艺实现比较简单。微透镜排列在曲面基底上,负责物空间特定方向上的一定大小的视场角,各微透镜的光线经过自由曲面和像差校正透镜组最后成像在一个平面像面上。在这个设计结构中,自由曲面透镜和像差校正透镜组需要在对应的子系统所负责视场角的扇形

区域内。以便保证各子系统的光线不会被相邻的子系统遮挡,并且不会妨碍其他子系统的透镜安装,从而使得各子系统之间不会相互影响,可以做到各通道成像在较大的同一像面上,并且做到各通道的像在像面上无重叠<sup>[10]</sup>。

### 3 结果与讨论

在光学软件上,对子系统进行了光学模拟优化,微透镜的设计参数如表1所示,每个子系统的

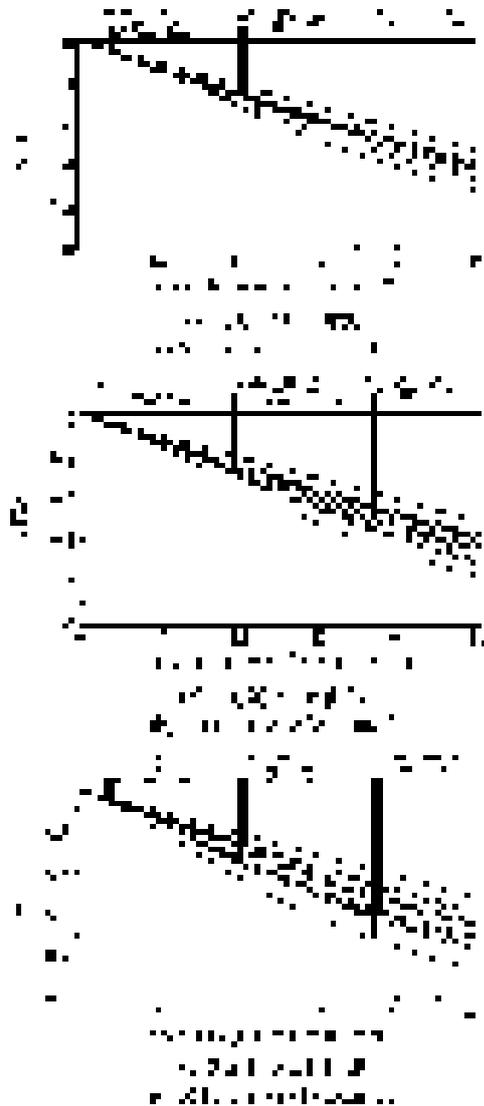


图6 子系统各通道的MTF曲线

Fig.1 MTF curves from different channels in the same subsystem

视场角为 $60^\circ$ ,在子午面上有6个微透镜,曲面地基的半径为74 mm。为了使得在整个系统中没有视场盲区,微透镜选择多边形结构,每个微透镜的视场为 $10^\circ$ ,自由曲面透镜位于微透镜阵列之后,子复眼系统各个通道的光线进行转折,使各个通道的成像基本与像平面垂直。每个通道的焦距为14 mm,光阑阵列设置在后校正组。通过所得 $\Delta l$ 值,求得阵列基底的外形结构。对后续像差校正组的尺寸和位置进行严格的控制,保证其尺寸不会超出视场范围之外,防止透镜阻挡其他子系统的光线。子系统各通道的MTF曲线如图6和表1

表1 各通道的中心像质

Table 1 Performance of central image point for different channels

| 通道 | 光轴偏移理想位置/mm | 畸变/% |
|----|-------------|------|
| 1  | 0.043       | <0.2 |
| 2  | 0.165       | <0.2 |
| 3  | 0.197       | <0.5 |

#### 参考文献:

- [1] JEONG K H, KIM J, LEE L P. Biologically inspired artificial compound eyes[J]. *Science*, 2006, 312: 557-561.
- [2] 张红鑫, 卢振武, 王瑞庭, 等. 曲面仿生复眼成像系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 8(6): 23-27.  
ZHANG H X, LU ZH W, WANG R T, et al. Design of compound optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 8(6): 23-27. (in Chinese)
- [3] 巩宪伟, 鱼卫星, 张红鑫. 仿生复眼成像系统设计及制作的研究进展[J]. *中国光学*, 2012, 6(1): 35-40.  
GONG X W, YU W X, ZHANG H X. Progress in design and fabrication of artificial compound eye optical system[J]. *Chinese Optics*, 2012, 6(1): 35-40. (in Chinese)
- [4] DUER F, BENITEZ P, MINANO J C. Analytic design method for optical imaging: coupling three rays sets using two free-form lens profiles[J]. *Opt. Express*, 2012, 20: 5576-5585.
- [5] ZHU J, YANG T, JIN G F. Design method of surface contour for a freeform lens with wide linear field-of-view[J]. *Opt. Express*, 2013, 21: 26080-26092.
- [6] BRUNT B V. Mathematical possibility of certain systems in geometrical optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, 11: 2905-2914.
- [7] CHENGA D, WANGAYT, HUA H. Free form optical system design with differential equations[J]. *SPIE*, 2010, 7849: 78490Q.
- [8] MINANO J C, BENITEZ P, LIN W, et al. An application of the SMS method for imaging designs[J]. *Opt. Express*, 2009, 17: 24036-24044.
- [9] MANALA H, SU T Q, HUANG R, DOMINGUEZ M Z. Aspheric and freeform surfaces metrology with software configurable optical test system; a computerized reverse Hartmann test[J]. *Opt. Eng.*, 2014, 53: 031305.
- [10] CAO A, SHI L F, SHI R Y. Image process technique used in a large FOV compound eye imaging system[J]. *SPIE*, 2012, 8558: 85581K.

所示,由图可以看出,各通道子午方向上的MTF曲线变化较大,较弧矢方向上的像质差,同时越靠近边缘的通道,其像质越差<sup>[11]</sup>,但对于整个复眼光学系统来说,像质得到了很大的提高。

## 4 结 论

本文针对人造复眼光学系统边缘视场成像质量不足的问题提出了新的解决方法,子复眼光学系统的各个通道公用整合自由曲面透镜和后续相差矫正镜,对于每个通道,自由曲面透镜相当于棱镜,对光线进行转折,该方法相较于传统的三层曲面复眼复眼光学系统,在提高像质的基础上简化了系统结构。通过理论说明和系统模拟,像质评价对所提出的方法进行了验证,证明了该方法的可行性。该方法可使整个光学系统的理论视场角达到 $180^\circ$ ,同时,提高边缘视场的像质,光学系统的结构也得到了简化。

[11] FALLAH H R, KARIMZADEH A. MTF of compound eye[J]. *Opt. Express*, 2010, 18:12304-12310.

作者简介:



王晶(1966—),女,吉林九台人,研究员,硕士生导师,1987年于东南大学获得学士学位,主要从事光电成像与测量技术方面的研究。E-mail: wangjingyxl@ sina.com



崔恩坤(1988—),男,山东临沂人,硕士研究生,2012年于兰州大学获得学士学位,主要从事机载红外光学系统设计方面的研究。E-mail: cuiek08@163.com

## 《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04; 国内外公开发行人, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- |                 |                |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国光学学会会刊     |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊数据库  |
| ★ 美国《化学文献》      | ★ 中国期刊全文数据库    |
| ★ 波兰《哥白尼索引》     | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》     | ★ 中国科技期刊数据库    |
|                 | ★ 中国光学期刊网数据库   |

**主要栏目:** 微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述等。

**发稿类型:** 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版: 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: [chineseoptics@ciomp.ac.cn](mailto:chineseoptics@ciomp.ac.cn); [zgxcn@126.com](mailto:zgxcn@126.com)

联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061      传 真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)