

用于目标识别的紧凑型仿生复眼光学系统设计

付跃刚, 赵宇, 刘智颖, 张凯, 朱启凡, 李亚红

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 大孔径仿生复眼光学系统兼顾了凝视大视场的同时, 克服了生物复眼孔径小、视距短的缺陷。通过对仿生复眼视场拼接方法的分析, 研究了实际阵列周期与理论计算周期数的关系, 并提出了降低子眼系统密度的填补子眼法。通过研究球面固定本体设计中的几何关系, 建立了本体径向半径 d 与曲率半径 R 的数学关系, 提出了球面固定本体的设计方法, 完善了之前提出的仿生复眼视场拼接理论。通过实际的装调实验, 验证了设计方法的正确性。利用该方法可提高仿生复眼系统的集成性, 减小系统尺寸, 推动了仿生复眼光学系统的实际应用。

关键词: 仿生复眼; 目标识别; 视场拼接; 设计方法

中图分类号: Q692; TH702 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0602001

Design of compact bionic compound eye optical system used for target identification

Fu Yuegang, Zhao Yu, Liu Zhiying, Zhang Kai, Zhu Qifan, Li Yahong

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

Abstract: The large-aperture bionic compound eye optical system can have a large field of view, it overcomes the defects that the aperture of biological compound eyes is small while the vision distance is short. The relationship between the actual array period and theoretical calculated period number was researched through analyzing the field stitching method of bionic compound eye, the method called "padding sub eye method" was proposed to reduce sub eye configuration density. By studying the geometry relationship of the fixed spherical body design, the mathematical connection between the main body vertical radius d and the curvature R was established, the design method of fixed spherical body was proposed, and the proposed bionic compound eye field stitching theory was perfected. Finally, the correctness of the design method through the actual alignment experiments was verified. This method can improve the integration of the bionic compound eye system, reduce system size, and promote the practical application of bionic compound eye optical system.

Key words: bionic compound eye; target identification; fields stitching; design method

收稿日期: 2016-10-05; 修订日期: 2016-11-03

基金项目: 吉林省自然科学基金(20130101JC032)

作者简介: 付跃刚(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学系统设计、仿生光学、偏振光谱成像等领域方面的研究。

Email: fuyg@cust.edu.cn

通讯作者: 刘智颖(1981-), 教授, 博士, 主要从事光谱偏振成像技术和仿生光学方面的研究。Email: lzy@cust.edu.cn

0 引言

随着微电子技术的快速发展,人们对光学仪器设备小型化、集成化的需求越来越高,而在传统单孔径光学系统中,其极限分辨率不仅受衍射极限和几何像差的限制,高效的光学系统设计也受限于探测器的奈奎斯特频率。尽管可通过系统结构复杂化以减小几何像差,提高分辨率,但导致成本的提高及系统尺寸的增大,而且难以克服大视场与高分辨率难以兼顾的矛盾。

昆虫复眼以其独特的生理结构,具有极高的集成性,在兼顾大视野监视的同时,对运动目标极其敏感。这一功能特性弥补了单孔径系统的固有缺陷^[1-3]。因此,针对仿生复眼成像系统的研究逐渐成为国际研究热点。日本科学家 Tanida 带领的研究团队利用纽扣般大小的复眼成像系统(TOMBO),实现了 3 维高分辨率成像^[4]。加拿大 York University 也提出并设计了基于蜻蜓眼复眼位标探测器^[5],国内研究所提出的单层和三层曲面复眼结构能够有效改善边缘视场的成像质量^[6-8]。以上系统多采用微透镜阵列形式,尽管结构和功能上更接近生物复眼,但微透镜的小孔径和小数值孔径的特点限制了系统的工作距离,而且高精度的微透镜设计增加了加工工艺的复杂程度。美国 Duke 大学设计的多维度十亿像素照相机,利用多子眼比例缩放法克服了仿生复眼系统视距小的缺陷,但其装调工艺复杂,且尺寸较大,仍处于实验室研究阶段^[9-11]。如何提高复眼成像性能的同时,降低系统尺寸,是仿生复眼光学仪器研究的关键之一。

笔者所在课题组开展了仿生复眼系统的研究,通过分析仿生复眼子眼系统视场关系,建立了仿生复眼系统子眼分布与子眼视场的数学关系,并设计了圆周阵列子眼分布的原理样机^[12-13]。尽管原理样机成像结果验证了理论的正确性,但系统尺寸大,空间利用率较差。因此,对视场拼接理论进行进一步推导,得出了能够满足不同要求的子眼布局与视场关系,并对系统尺寸关系进行分析,完成了一个用于目标识别的紧凑型仿生复眼光学系统,并采用 3 维立体式结构布局设计,解决了子系统间的机械干涉问题,系统径向尺寸小于 190 mm,工作距离可达 3 km,

全视场 $2W \geq 50^\circ$ 。该系统不仅克服了生物子眼小孔径、视距短的缺陷,且集成性高。

1 视场拼接理论与子眼布局

并列型复眼(Apposition Compound Eye)是自然界复眼中重要的类型之一,其成像原理如图 1 所示。

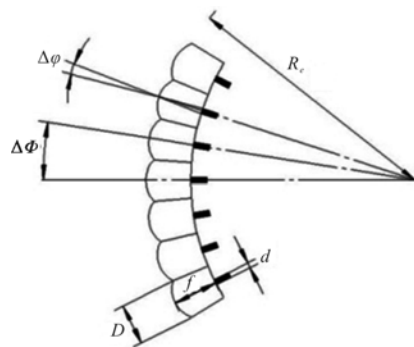


图 1 并列复眼成像原理

Fig.1 Imaging principle of apposition compound eye

其中, R_e 为子眼分布曲面的半径, D 与 f 分别为子眼通光孔径与焦距, d 表示接收器单元直径, $\Delta\phi$ 表示子眼视场角, $\Delta\Phi$ 表示相邻子眼光轴夹角。

在生物并列型复眼中,每一个子眼往往作为独立的成像单元对应单一感光细胞,因此,整个复眼的奈奎斯特角频率 ν_s 为:

$$\Delta\Phi = D/R_e \quad (1)$$

$$\nu_s = \frac{1}{2\Delta\Phi} \quad (2)$$

由于生物复眼的小孔径特点,使其成像分辨率受明显的衍射限制,其极限分辨角 $\Delta\phi$ 为:

$$\Delta\phi = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (3)$$

子眼空间角截止频率 $\nu_{\infty} = 1/\Delta\phi$, 因此子眼系统的截止频率与子眼孔径成正比^[16]:

$$\nu_{\infty} = \frac{D}{1.22\lambda} \quad (4)$$

通过比例放大法进行子眼缩放的方法,可以克服子眼的衍射受限,并可利用现代传感器技术提高子眼系统空间分辨率。探测器奈奎斯特频率 ν_d 决定仿生子眼系统的空间截止频率,而且极限分辨角 $\Delta\phi$ 由系统的焦距与探测器像元尺寸 s 决定:

$$\nu_d = \frac{1 \text{ mm}}{2 \times s}$$

子眼结构的变化导致相邻子眼间视场关系变得复杂。在之前的研究过程中,可以确定子眼视场拼接与子眼系统参数之间的数学关系:

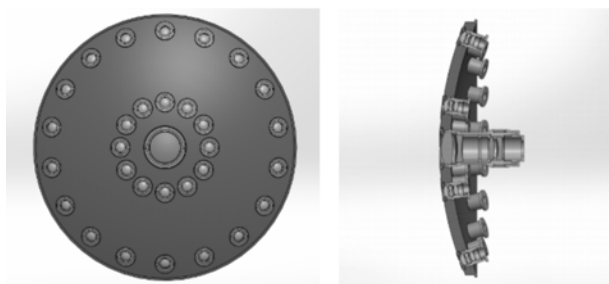
$$\begin{cases} w_{0x}+w_{1x} \geq \Delta\Phi_1 \\ w_{1x}+w_{2x} \geq \Delta\Phi_2 \end{cases} \quad (5)$$

$$W=\Delta\Phi_1+\Delta\Phi_2+w_{2x} \quad (6)$$

式中: $\Delta\Phi_i$ 为相邻光轴夹角; $2w_{0x}$ 为中心光学视场; $2W$ 为整个复眼系统视场角。利用公式(5)、(6)可以确定子眼系统 X 方向(纵向)分布位置。根据公式(7)可以圆周阵列实现 Y 方向视场拼接的子眼阵列数:

$$n_i = \frac{\pi \cdot \sin\left(\Delta\Phi_i + \arctan\left(\frac{x_i}{2f'}\right)\right)}{\frac{y_i}{2f'}} \quad (7)$$

根据该结论设计了第一代大孔径复眼光学系统的结构如图 2 所示。



(a) 系统正面视图 (b) 系统剖视图

(a) Front view of the system (b) Sectional view of the system

图 2 仿生复眼光学系统结构图

Fig.2 Structure chart of the bionic compound eye optical system

该系统由中心高分辨率系统和边缘大视场低分辨圆周阵列光学系统组成,尽管系统工作距离可达 3 km,全视场达 54°,但为避免边缘阵列子眼系统间的机械干涉,增大了系统的径向尺寸。为降低第 1 阵列子眼系统密度,提高系统集成性,对实际阵列数目 n_i 与理论计算值 n_i 进行分析,其结果如下:

(1) 当实际阵列周期数 $n_i=n_i$ 时,子眼阵列系统视场边缘能够依次相接,视场无盲区;

(2) 当实际阵列周期数 $n_i>n_i$ 时,子眼阵列系统视场边缘能够依次相接或重合,视场无盲区;

(3) 当实际阵列周期数 $n_i<n_i$ 时,相邻子眼系统视场边缘不能相接或重合,即产生视场盲区,且盲区位置同样具有阵列特性。将公式(7)进行变型,得到:

$$\frac{x_i}{2f'} = \tan\left[\arcsin\left(\frac{ny_i}{2\pi f'}\right) - \sum_{i=1}^i \Delta\Phi_i\right] \quad (8)$$

根据公式(8)可以计算当阵列周期数 $n_i<n_i$ 时,探测器上图像重合点坐标,计算出系统的无盲区视场 $2W'$ 。此时,可填补子眼法补充盲区视场,设该子眼全视场为 $2\omega_b$,则拼接无盲区时,该系统光轴与中心光轴夹角 $\Delta\Phi_b$ 应满足公式(9)确定的边界条件:

$$\Delta\Phi_b \leq W' + \omega_b \quad (9)$$

该系统视场中心位于前一阵列系统中相邻两个子眼视场夹角的角平分线上,图 3 为填补后视场拼接示意图。其中,虚线矩形区域为填补子眼的视场空间。

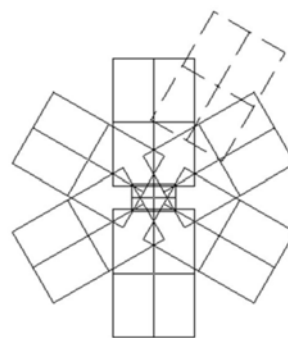


图 3 填补视场示意图

Fig.3 Schematic diagram of filling field

2 固定本体的尺寸关系

球面固定本体作为子眼镜头的定位与支撑结构,不仅是子眼镜头在物方视场空间完成理论拼接设计的关键,更决定了仿生复眼光学系统的整体尺寸。

球面固定本体的曲率半径 R_x 及其半口径 d 决定球面固定本体的外形尺寸,其几何关系如图 4 和图 5 所示。

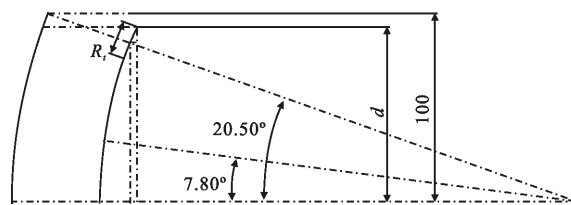


图 4 球面固定本体 R_x 和 d 的几何关系

Fig.4 Geometry relationship between the R_x and d of the fixed spherical body

根据图 4 所示,球形本体径向半径 d 与球面曲率半径极限值 R_{lim} 的数学关系可表示为:

$$R_{lim} = \frac{d}{\sin\Delta\Phi_1} \quad (10)$$

当极限值 R_{\min} 过小时, 边缘阵列子眼镜头在安装过程中产生机械干涉。

图 5 中 R_1 为边缘第 1 层阵列子眼镜头光轴方向在球面本体上通孔的口径, 利用计算圆弧矢高的方法, 可得到本体径向半径 d 限制下的最大球面曲率半径 R_{\max} :

$$R_{\max} = \frac{d - \frac{R_1}{2} \cdot \cos \Delta \Phi_1}{\sin \Delta \Phi_1} \quad (11)$$

当球面曲率半径越小时, 通孔口径 R_1 越大。此时, 若 R_1 不变, 则剩余可布局空间越大。

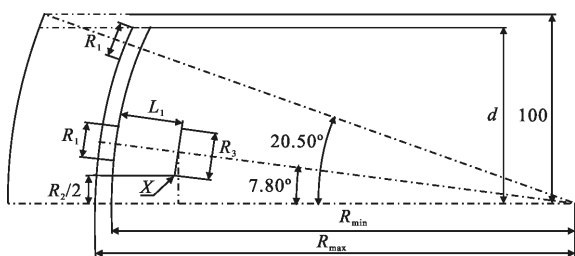


图 5 球面固定本体曲率半径取值下限计算方法

Fig.5 Calculation method for limited value of radius curvature of the fixed spherical body

图 5 中, 球面的曲率半径过小时, 边缘第 1 阵列子眼镜头与中心子眼镜头发生机械干涉, 即图中 X 点出现时的情形, 此时的球面曲率半径应是其最小临界值, 表示为 R_{\min} 。图中 R_3 为子眼镜后端 COMS 光电传感器的径向直径, R_2 为中心子眼镜头镜筒的外径, L_1 为边缘阵列子眼镜头的全长, 利用计算圆弧矢高方法, 得到 R_{\min} 为:

$$R_{\min} = L_1 + \frac{\frac{R_3}{2} \cdot \cos \Delta \Phi_1 + \frac{R_2}{2}}{\sin \Delta \Phi_1} \quad (12)$$

3 用于目标识别的紧凑型仿生复眼光学系统设计

通过以上分析, 对第一代大孔径仿生复眼的子眼布局进行修正, 并设计完成第二代用于目标识别的紧凑型仿生复眼光学系统。

3.1 子眼系统及其布局设计

该系统由中心光学系统和边缘阵列子眼光学系统组成: 中心光学系统焦距较大, 可用于目标的高分辨率识别; 边缘阵列子眼光学系统焦距较小, 但视场较

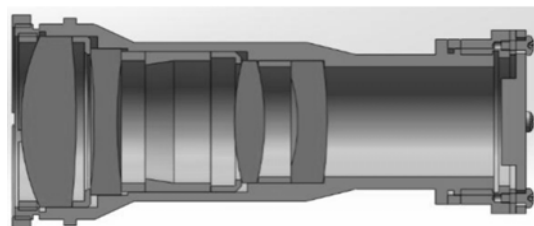
大, 用于目标的大范围捕获。

表 1 所示为不同子眼光学系统参数, 子眼系统结构如图 6 所示。其中, 由于定位位置不同, 边缘阵列系统采用两种不同的镜壁结构, 在固定后沿各自光轴产生微量位移, 形成三维层叠式结构, 可避免相邻子眼的机械干涉。而沿光轴方向的微量位移, 不影响系统的成像质量和视场范围。

表 1 子眼系统参数

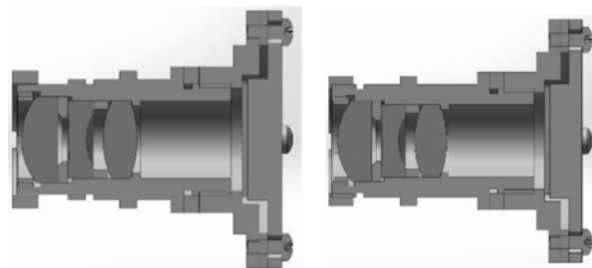
Tab.1 Parameters of sub-eyes systems

	Center optical system	Edge array optical system
Detector size	4.51 mm×2.88 mm	4.51 mm×2.88 mm
Focal length f'	60 mm	20 mm
Field of view	2.15°×1.37°	6.43°×4.12°
$F\#$	2.3	2.6



(a) 中心光学系统光机结构

(a) Opto-mechanical structure of the center optical system



(b) 边缘阵列子眼光学系统光机结构

(b) Opto-mechanical structure of an edge array sub-eye optical system

图 6 子眼光学系统光机结构

Fig.6 Opto-mechanical structure of sub-eye optical systems

根据子眼光学系统的设计结果, 将已确定的相关参数代入公式(5)~(9), 确定带有填补视场的 29 组元仿生复眼光学系统子眼的位置及其物方视场关系。并以坐标形式标定该系统中 28 个边缘阵列子眼的位置, 即 $(\Delta \Phi_i, \gamma)$ 。其中, $\Delta \Phi_i$ 表示阵列第 i 表层阵

列子眼光轴相对中心光轴夹角, γ 表示第 i 表层阵列中子眼与基元子眼系统光轴所确定的基准面的相对

转动角, 详细位置参数如表 2 所示。系统物方视场关系如图 7 所示。

表 2 仿生复眼光学系统子眼位置参数

Tab.2 Sub-eye location parameter of the bionic compound eye optical system

Array1	$(\Delta\Phi_1, \gamma)$	Array2	$(\Delta\Phi_2, \gamma)$	Array3	$(\Delta\Phi_3, \gamma)$	Array3	$(\Delta\Phi_3, \gamma)$
1	$(7.8^\circ, 0^\circ)$	1	$(13^\circ, 30^\circ)$	1	$(20.5^\circ, 0^\circ)$	9	$(20.5^\circ, 180^\circ)$
2	$(7.8^\circ, 60^\circ)$	2	$(13^\circ, 90^\circ)$	2	$(20.5^\circ, 22.5^\circ)$	10	$(20.5^\circ, 202.5^\circ)$
3	$(7.8^\circ, 120^\circ)$	3	$(13^\circ, 150^\circ)$	3	$(20.5^\circ, 45^\circ)$	11	$(20.5^\circ, 222.5^\circ)$
4	$(7.8^\circ, 180^\circ)$	4	$(13^\circ, 210^\circ)$	4	$(20.5^\circ, 67.5^\circ)$	12	$(20.5^\circ, 247.5^\circ)$
5	$(7.8^\circ, 240^\circ)$	5	$(13^\circ, 270^\circ)$	5	$(20.5^\circ, 90^\circ)$	13	$(20.5^\circ, 270.5^\circ)$
6	$(7.8^\circ, 300^\circ)$	6	$(13^\circ, 330^\circ)$	6	$(20.5^\circ, 112.5^\circ)$	14	$(20.5^\circ, 292^\circ)$
				7	$(20.5^\circ, 135.5^\circ)$	15	$(20.5^\circ, 315^\circ)$
				8	$(20.5^\circ, 157.5^\circ)$	16	$(20.5^\circ, 337.5^\circ)$

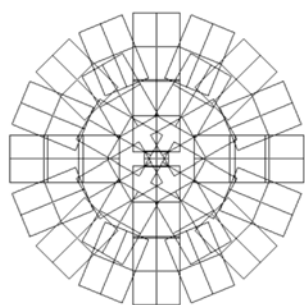


图 7 视场分布模拟正视图

Fig.7 Simulation front view of distributed field

3.2 球面固定本体的结构设计

由子眼系统的光机结构设计结果, 得到球面固定本体结构设计所需计算参数, $L_1=31.5\text{ mm}$, $R_3=25\text{ mm}$, $R_2=30\text{ mm}$, 考虑到边缘阵列子眼镜头在球面阵列上的固定方式, 所以 R_1 的值给定为 18 mm 。将 L_1, R_3, R_2 带入公式(12)中得到 $R_{\min}=232.27\text{ mm}$, 近似得到 $R_{\min}=234\text{ mm}$ 。

将球面曲率半径 $R_{\max}=234\text{ mm}$ 带入公式(11)中, 通过计算得到球罩有效半口径 d 的最小值为 90.9 mm , 所以依据限定条件和经验, 最终给出球面固定本体的有效半口径为 93 mm , 此时球面的曲率半径经过计算后得到最大临界值为 242 mm , 因此, 曲率半径的取值范围为 $234\text{ mm}\times 242\text{ mm}$ 。

为使边缘第一阵列子眼镜头与中心子眼镜头尽量避免机械结构干涉, 同时保证球面固定本体有一

定的物理空间用来固定边缘第 2 阵列子眼镜头, 最终确定球面固定本体的曲率半径是 240 mm , 有效半口径是 93 mm , 设计结果如图 8 所示。

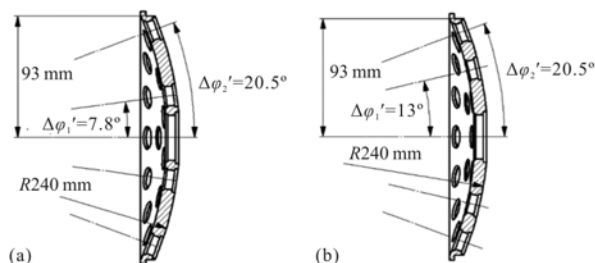


图 8 球面固定本体剖视图

Fig.8 Sectional view of the fixed spherical surface body

4 紧凑型仿生复眼光学系统设计的装调技术研究

在仿生复眼成像系统中, 每一层边缘阵列子眼镜头与中心子眼镜头光轴夹角 $\Delta\Phi(i=1, 2, 3)$ 是保证子眼镜头在子午像面内物方视场空间重合度要求的关键因素。

尽管五轴数控加工中心加工, 可以提供较高精度的子眼固定孔位轴线夹角, 但多通道子眼系统的独立性对每一个子眼系统中相对位置的实际精度提出了更高的要求。因此, 利用两个自带辅助光源的莱卡 TM5100A 自准直经纬仪进行装调, 双经纬仪实量

光轴夹角原理如图 9 所示。

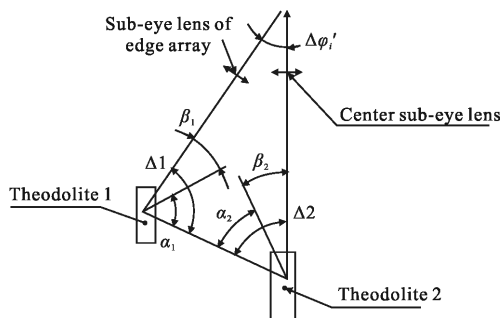


图 9 两台经纬仪实量光轴夹角原理

Fig.9 Optical axis angle principle of the two theodolites

在气浮光学平台上，通过互瞄的方式进行对准后，通过经纬仪输出的转动角度值计算实际光轴夹角，调试过程如图 10 所示。

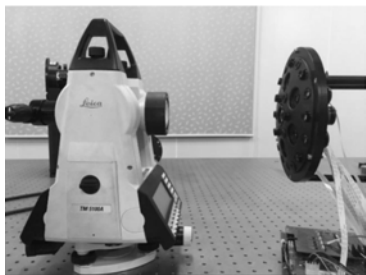


图 10 实际装调过程

Fig.10 Actual alignment

在实际装调过程中，首先对经纬仪进行校准使其与光学平台保持水平，将镜头的俯仰角调整至 0°，然后将中心子眼镜头安装在球面固定本体上，通过调整光学调架，使其所接收到十字丝像的交点落在像面中心位置，最后调整辅助工装，当旋转台工作时，使得经纬仪的十字丝像的交点在探测器像面的中心位置不动，可以证明：经纬仪的光轴与中心子眼镜头的光轴严格平行并保持一致，与此同时两根光轴和旋转机械轴均保持平行。

当边缘阵列子眼镜头调整至其光轴和经纬仪的光轴严格平行时，开始对子眼镜头整体旋转，利用计算机辅助装调技术，计算当前十字丝标准像与探测器自身中心十字像素的夹角，调整探测器至设计位置，实现各探测器的旋转角度的调整。

得到调整后的紧凑型仿生复眼光学系统如图 11 所示。



图 11 紧凑型仿生复眼光学系统

Fig.11 Compact bionic compound eye optical system

与第一代大孔径复眼光学系统相比，利用填补子眼法修正后的系统空间利用率提高，通过层叠式的结构设计，系统尺寸降低的同时，避免了子眼系统的机械干涉。验证了推导出的填补子眼法视场的设计方法和球面固定本体尺寸方法的正确性。

5 结论

文中研究了仿生复眼视场拼接方法中实际阵列周期与理论计算周期数的关系，通过分析球面固定本体设计中几何关系，建立了本体径向半径 d 与曲率半径 R 的数学关系，总结了仿生复眼光学系统的设计方法。利用该方法设计了用于目标识别的紧凑型仿生复眼光学系统，克服了之前系统空间利用率低、尺寸大的缺点，提高了系统的集成性。通过实际的安装调试结果，验证了该方法对仿生复眼系统设计的正确性，利用该方法指导大孔径仿生复眼中子眼系统设计与结构布局优化，可推动仿生复眼光学系统的进一步应用。

参考文献：

- [1] Xu Yan, Yan Shuhua, Zhou Chunlei, et al. Advances in bionic study on insects' compound eyes [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(Z): 10-12. (in Chinese)
徐琰, 颜树华, 周春雷, 等. 昆虫复眼的仿生研究进展[J]. 光学技术, 2006, 32(Z): 10-12.
- [2] Wang Jing, Cui Enkun. Design of large FOV curved artificial compound eye with freeform lens [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 969-974. (in Chinese)
王晶, 崔恩坤. 大视场曲面复眼光学系统设计 [J]. 中国光学, 2014, 7(6): 969-974.
- [3] Hao Yongping, Zhao Longfei, Zhang Jiayi. Optimal research

- of aspherical zoom curved compound eye [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 157–161. (in Chinese)
- 郝永平, 赵龙飞, 张嘉易. 非球面变焦距曲面复眼的优化研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 157–161.
- [4] 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.
- [5] Jacques Duparré, Peter Schreiber, André Matthes, et al. Microoptical telescope compound eye [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 889–903.
- [6] Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, Wang Ruiting, et al. The building and analysis of overlap compound eye optical formulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 14(3): 346–350. (in Chinese)
- 张红鑫, 卢振武, 王瑞庭, 等. 曲面复眼成像系统的研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3): 346–350.
- [7] Gong Xianwei, Yu Weixing, Zhang Hongxin, et al. Progress in design and fabrication of artificial compound eye optical systems[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 34–45. (in Chinese)
- 巩宪伟, 鱼卫星, 张红鑫, 等. 仿生复眼成像系统设计及制作的研究进展[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 34–45.
- [8] Cheng Chun, Wang Keyi, Cao Zhaolou, et al. Imaging characteristics of logarithmic axicon for application in compound eye system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1284–1289. (in Chinese)
- 程纯, 王克逸, 曹兆楼, 等. 曲面复眼中对数型锥透镜成像特性研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1284–1289.
- [9] Deng Z, Chen F, Yang Q, et al. Dragonfly-eye-inspired artificial compound eyes with sophisticated imaging [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(12): 1995–2001.
- [10] Son H S, Johnson A, Stack R A, et al. Optomechanical design of multiscale gigapixel digital camera [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(8): 1541–1549.
- [11] Marks D L, Hui S S, Kim J, et al. Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 527–529.
- [12] Fu Yuegang, Zhao Yu, Liu Zhiying, et al. Design of bionic compound eye optical system based on fields splicing method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(2): 422–429. (in Chinese)
- 付跃刚, 赵宇, 刘智颖, 等. 基于视场拼接方法的仿生复眼光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 422–429.
- [13] Gao Tianyuan, Dong Zhengchao, Zhao Yu, et al. Structure and alignment of field stitching compound eye optical imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 43–48. (in Chinese)
- 高天元, 董正超, 赵宇, 等. 视场拼接复眼成像系统结构及装调方法[J]. 光子学报, 2014, 43(11): 43–48.