

文章编号 1004-924X(2015)11-3018-08

基于微端面光纤面板的多孔径视场重叠复眼的视场模型

裘 溯^{1,2*}, 倪 宇¹, 金伟其^{1,2}, 郭 宏¹, 刘志刚¹, 米凤文¹

(1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:介绍了多孔径视场重叠的仿生复眼成像系统的性能,建立了基于微端面光纤面板的多孔径视场部分重叠型复眼的成像视场模型。系统地分析了选用的器件参数如顶面、侧面和角面子复眼间的视场角、视场重叠率、视场重叠距离等参数对系统性能的影响,并通过实验系统的复眼视场以及视场重叠率的测量验证了模型的有效性。实验测试显示:本文建立的视场模型与测试结果具有很好的一致性,系统侧面与角面视场的实测值与理论值的误差分别为 3.58% 和 12%;顶面与侧面和角面的视场重叠率误差分别为 3.33% 和 5.17%。该复眼成像视场模型为进一步研究复眼成像的目标探测和跟踪理论奠定了基础,对多孔径视场重叠仿生复眼成像系统的优化设计具有指导作用。

关键词:复眼;多孔径成像系统;成像视场;视场重叠;微端面光纤面板

中图分类号:TH703;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152311.3018

FOV modeling of multi-aperture superposition compound eye based on micro-surface fiber faceplate

QIU Su^{1,2*}, NI Yu¹, JIN Wei-qi^{1,2}, GUO Hong¹, LIU Zhi-gang¹, MI Feng-wen¹

(1. Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System of the Ministry of Education, College of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Science and Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

* Corresponding author, E-mail: edmondqiu@bit.edu.cn

Abstract: The performance of multi-aperture superposition compound eye imaging systems was introduced. The FOV (field of view) modeling for a multi-aperture partial superposition compound eye imaging system based on a micro-surface fiber faceplate was established. The effects of some device parameters such as the FOV, the overlapping rate of different sub-FOVs and the minimal FOV overlap distance between top sub-surface and side sub-surface on the system performance were analyzed. Then, the feasibility of the FOV modeling was verified by measurement of compound eye FOV and FOV overlap rates in an experimental system. Experimental results indicate that the FOV modeling is in accordance with the real imaging system. The deviations of side and corner FOV angles of the system are 3.58% and 12%, respectively, the deviation of overlapping fields between top surface and side surface is 3.33%, and the deviation of overlapping fields between top surface and corner surface is 5.17%. The artificial compound eye FOV modeling establishes a theoretical basis for

收稿日期:2015-07-02;修订日期:2015-08-07.

基金项目:微光夜视技术重点实验室基金资助项目(No. 9140C380503120C38148).

further study of the target detection and tracking theory of compound eye imaging and has a guiding significance for the designing of multi-aperture FOV artificial superposition compound eye systems.

Key words: compound eye; multi-aperture imaging system; imaging FOV; overlapping FOV; micro-surface fiber faceplate

1 引 言

单目成像系统与复眼成像系统是自然界普遍存在的两种视觉系统,许多动物在进化过程中选择了复眼形式,说明复眼在某些方面优于单眼^[1],例如:体积小、重量轻、视场大、灵敏度高。复眼可用于偏振光导航及对运动目标的快速定位等。因此,复眼成像原理和技术一直是人们研究的重要方向,并在雷达系统、微型飞行器、舰艇搜索与跟踪系统等领域具有广泛的应用前景^[2]。

昆虫的复眼由许多个结构与功能相同的子眼组合而成^[3]。昆虫复眼的结构一般包括子眼(屈光器、感光器)、隔光器和视觉中枢。根据不同类型的复眼成像原理,复眼大致可分为并列型、光学折射重叠型、神经重叠型和光学反射重叠型 4 大类。自 21 世纪以来,人工仿生复眼的研究取得了大量成果^[2]。2000 年,日本 Tanida 等提出平面型复眼成像系统(Thin Observation Module by Bound Optics, TOMBO)^[4]。2004 年, Jacques 等提出仿生并列复眼成像系统(Artificial Apposition Compound Eye Objective, APCO)^[5]。它们在结构上都是平面结构,在很大程度上丧失了曲面复眼结构视场大的特点^[6]。曲面复眼系统设计通常需要采用微透镜阵列结构,设计和制作难度都较大。2006 年,张红鑫等研究了单层曲面和三层曲面型光学复眼成像系统,将曲面场镜阵列引入曲面复眼成像系统,提高了其边缘视场的成像质量,并增大了视场角^[7]。王晶等人通过在曲面复眼成像系统中引入自由曲面透镜,解决了曲面复眼光学系统视场边缘像质难以提高的问题^[8]。2007 年, Laycock 等提出一种由球面分布的微型透镜阵列、隔光器、中继光纤面板(FOFP)和光电成像传感器(CCD/CMOS)组成的多孔径仿生复眼成像系统^[9],不仅获得了 120°视场的清晰图像,而且减轻了光学微透镜的设计和制作难

度,减小了复眼系统的体积和重量,成为一种具有实用性的复眼成像模式。

近年来,本课题组在文献^[9]的基础上,对多孔径仿生复眼进行了深入研究^[10-12],发现这种仿生复眼成像不仅各子眼图像不均匀,而且各子眼视场有交叠,具体的视场交叠程度与系统设计密切相关,并可直接影响系统的成像性能和应用模式。本文研究了这种多孔径视场重叠的仿生复眼成像系统的视场模型,分析了系统参数对系统性能的影响,为多孔径视场重叠仿生复眼成像系统的设计奠定了基础。

2 多孔径视场重叠复眼成像系统

如图 1 所示,多孔径复眼成像系统主要由多孔径成像、图像传输以及图像转换和采集 3 部分组成。多孔径成像部分由 9 个焦距相同的光学镜头、对镜头起支撑作用的球冠或龟背形支撑体、以及防止子眼串光的隔光片组成。图像信息传输部分采用含有 9 个微端面的 FOFP 作为中继光学元件,通过 9 个相同焦距的透镜将目标场景同时成像在光纤面板的微端面上,由光纤面板将场景图像传递到另一端单个 CCD/CMOS 成像传感器上,实现图像的光电转换和采集。

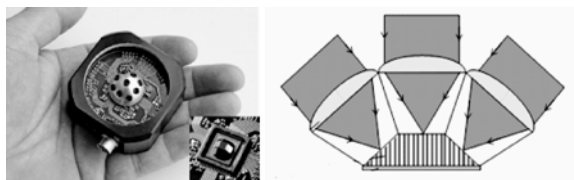


图 1 多孔径仿生复眼成像组件及 FOFP 结构图

Fig. 1 Structures of imaging component of multi-aperture bionic compound eye and FOFP

如图 2 所示,在前期研究^[10-12]中成像区域为圆柱形光纤面板的内接正方形,将端面切割成 9 个微

端面(中间为顶面,在顶面的四周以倾角 β 切出 4 个侧面,沿着相邻侧面的边进一步切出 4 个角面)。9 个微端面的底面投影为一正方形(边长为 a ,即 $R/3\sqrt{2}$, R 为光纤面板半径),但由于存在倾角,侧面为 $[R/3\sqrt{2}] \times [R/(3\sqrt{2}\cos\beta)]$ 的矩形,角面呈菱形。

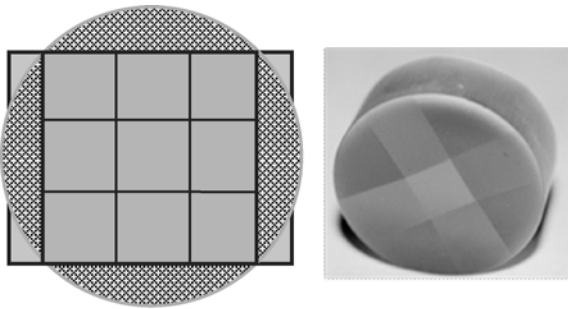


图 2 光纤面板微端面排布与实际光纤面板的微端面
Fig. 2 Arrangement of micro-surface on fiber faceplate and its photo

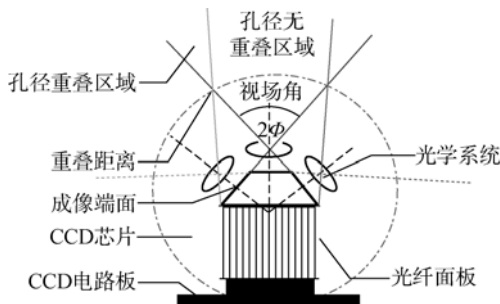


图 3 多孔径视场重叠复眼系统结构
Fig. 3 Structure of multi-aperture section overlap compound eye

图 3 为多孔径视场重叠复眼成像系统的结构示意图,9 个复眼光学镜头的轴线分别与对应微面中心的法线重合,且微面与光学镜头主面的距离为镜头的焦距 f' ;微端面光纤面板的另一端与 CCD 成像传感器耦合,实现多孔径成像场景图像在单一成像传感器上的成像采集。可以看出:(1)整个复眼的视场由各子复眼的视场构成;(2)相邻子复眼的视场可能部分重叠,由此可构成双目或多目立体视觉,提供空间目标快速定位的基础信息;(3)发生子复眼成像视场重叠需要在一定的距离之外,且发生双目或多目视场重叠的距离不同;(4)在成像图像中,视场重叠空间的场景对应的子复眼成像位置存在相对顶面中心的对称

平移;(5)由于侧面和角面相对于探测器平面存在一定的倾角,成像存在沿倾角方向的空间线性变形,在后续图像处理中必须加以校正;(6)复眼系统的空间分辨率取决于光学透镜、光纤面板的光纤尺寸、成像传感器组件的像元规模和性能。

成像视场以及空间目标定位是复眼成像系统的主要性能参数,它们与透镜参数、光纤面板直径、切割倾角等参数密切相关。所以建立成像系统性能与系统元件/部件参数之间的关系模型,对于复眼成像系统的性能分析、图像处理和系统优化设计具有重要的意义。

3 多孔径视场重叠复眼成像的视场模型

如图 4 所示,以顶面中心过透镜轴线为坐标系 Z 轴,沿矩形侧面边沿方向建立 X 轴和 Y 轴。由于复眼具有对称性,这里只对第一象限进行分析。

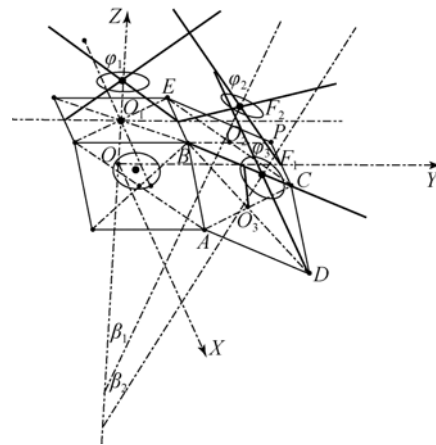


图 4 复眼系统的世界坐标系及空间结构
Fig. 4 World coordinate system of compound eye and its spatial structure

复眼成像系统的顶面边长 $a=R/3\sqrt{2}$,顶面光轴与侧面光轴的夹角 $\beta_1=\beta$ 、顶面光轴与角面光轴的夹角为 β_2 、侧面光轴与角面光轴的夹角为 β_3 、透镜焦距为 f' ,由此可建立复眼成像视场和空间目标位置的模型。

3.1 子复眼的视场

3.1.1 顶面子复眼的视场

由于光纤面板顶面位于子复眼光学镜头的焦

参数可得视场重叠距离为:

$$L_1 = a \cot \varphi_{12} \frac{2 \tan \beta + 2 \sqrt{2} \cot(\beta - \varphi_{31})}{\cot(\beta - \varphi_{31}) - \cot \varphi_{12}} - f' \quad (12)$$

当物距 $L > L_1$ 时,定义顶面与侧面的视场重叠率为(子午面内):

$$\eta_{1-3} = \frac{(L - L_1)(\tan \varphi_{12} - \tan(\beta - \varphi_{31}))}{2L \tan \varphi_{12}} \quad (13)$$

3.2.3 侧面与角面的重叠视场

从图 4 可看出角面和侧面的成像情况,四边形 ABCD 是角面,矩形 BCPE 是侧面, O_3 和 O_2 分别为两个面的中心, F_1, F_2 是两个面透镜所在的位置,与 O_2, O_3 的垂直距离为 f' 。经过 O_3 做 BC 边的一条垂线,交点为 T_1 ;过 O_2 做 BC 边交于 T_2 点的垂线,则两点并不重合,这是由角面的形状和各自的位置关系决定的,因此不能直接用图 5 求视场的重叠情况。但是,如果保持侧面角面的夹角不变,沿着 BC 边平移角面,即在角面 ABCD 所确定的平面内移动,使 T_1, T_2 点重合,这样可直接利用图 5 进行计算,且不会改变角面与侧面的最高不重叠物距和视场重叠比例。

侧面与角面的视场重叠距离为:

$$L_2 = a \cot \varphi_{22} + \frac{\sqrt{1 + \sin^2 \beta} \sin \beta_3}{\cot(\beta_3 - \varphi'_3) - \cot \varphi_{22}} = \frac{\cot(\beta_3 - \varphi'_3)(1 + \sqrt{1 + \sin^2 \beta} \cos \beta_3)}{\cot(\beta_3 - \varphi'_3) - \cot \varphi_{22}} - f' \quad (14)$$

当物距 $L > L_2$ 时,侧面与角面的视场重叠率为:

$$\eta_{2-3} = \frac{(L - L_2)[\tan \varphi_{22} - \tan(\beta_3 - \varphi'_3)]}{2L \tan \varphi_{22}} \quad (15)$$

其中:

$$\varphi'_3 = \arctan \frac{a \sqrt{1 + \sin^2 \beta}}{2f} \quad (16)$$

4 复眼成像系统分析

根据上述视场模型,采用 MATLAB 软件编写计算程序,输入镜头的焦距、光纤面板直径、切角就可计算出相应的参数。根据成像规律,直接采集到的图像呈现“错位”关系(如图6所示),即

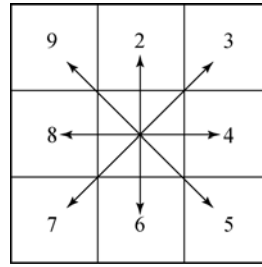


图 6 子眼图像调整方向

Fig. 6 Regulation orientation of subgraphs

本该在右上角的图像却在左下角,且存在视场重叠,因此需要对图像进行复位。如箭头所示,交换顶面(中间)两两相对的 4 组图像的位置,然后旋转 180°,即可显示正立的图像。

由于切角、镜头、光纤面板等器件的参数不同,最后系统的性能参数也会有很大差距,图 7、图 8 分别是切角 β 、镜头焦距 f 与各子眼视场重叠率 η 、系统视场角 FOV 及视场重叠距离 L_i 之间的关系曲线。从图 7 可以看出,切角越大,视场角与视场重叠距离会随之增大,但是重叠比例会减小,所以切角设计时视场重叠比例和系统视场角是一对矛盾。从图 8 可以看出,焦距越大,重叠比例和视场角会随之减小,但是视场重叠距离会增大。综合图 7、图 8 分析,焦距与切角对视场角的影响是相反的,而对重叠比例和视场重叠距离的影响是相同的,所以在选取器件参数与切角的时候,必须综合考虑这几个因素以及系统最终的应用目的,比如大视场或目标探测。另外要注意到如果切角太大,会有一部分光信息不能通过光纤面板而被 CCD 成像器件探测到,这十分不利于成像。所以需要在切角、镜头焦距与系统参数如子眼间的视场重叠比例和总体视场间找一个平衡。

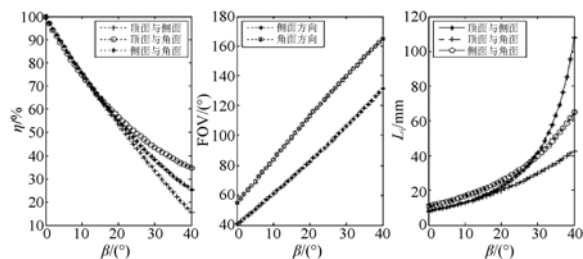


图 7 β 与 η 、FOV、 L_i 的关系 ($f=8$ mm)

Fig. 7 Relationships between β and η , FOV, L_i respectively ($f=8$ mm)

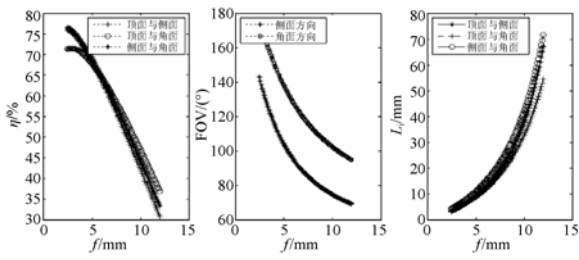


图 8 f 与 η 、FOV、 L_i 的关系($\beta=20^\circ$)

Fig. 8 Relationships between f and η , FOV, L_i respectively ($\beta=20^\circ$)

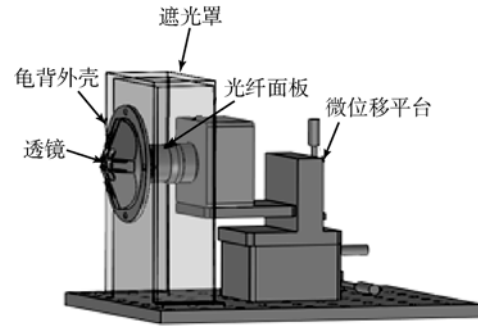


图 10 多孔径复眼实验系统的整体结构

Fig. 10 Schematic diagram of compound eye imaging system

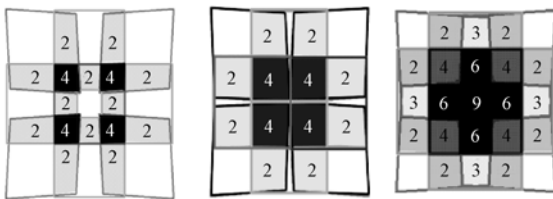


图 9 不同视场重叠率下全视场不同区域的重叠数

Fig. 9 Number of overlapping subgraphs in different areas of full field of view with different overlapping proportions

图 9 是拼接后各个面的重叠关系,标注数字的区域表示此区域内重叠的图像数,这种视场重叠为后续特征点的搜索带来了极大方便。例如,图 9 中间图像的每一部分基本都和周边图像重叠而且重叠数都为 4,即中间子眼观察到的任何目标都有另外 3 个子眼同时观测到,这样可提高目标空间的三维信息确定的定位精度和置信度。

5 模型验证实验及分析

为了验证本文复眼视场模型的有效性,利用如图 10 所示的复眼成像实验系统进行了成像视场和视场重叠率的测量。实验系统的透镜焦距为 4.5 mm,光纤面板直径为 25 mm,切角为 20° 。在距离复眼顶面镜头 500 mm 处放置一黑白棋盘格标靶,利用红色激光照射靶标产生红色点光源目标,此外无其它光源照射。采集的图像如图 11 所示,可以看到各个子眼都可以探测到红色光点。由于各子眼中光点为不规则光斑,因此这里采用光斑重心法^[13]确定光斑的中心坐标位置。

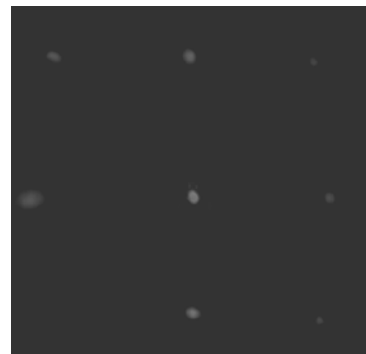


图 11 系统采集的图像

Fig. 11 Image captured by proposed compound eye imaging system

5.1 系统视场角测量

分别沿棋盘格水平、 45° 方向移动激光斑,记录所能看到光斑的极限位置,进而计算出实验系统的视场角度。表 1 给出了实验系统视场的实测值与理想值及其误差。

表 1 系统的实测与理想视场角及其误差

Tab. 1 Actual and ideal FOVs of system and their deviations

	侧面方向视场角	角面方向视场角
测量值/ $^\circ$	102.2	116
理论值/ $^\circ$	106	132
相对误差/%	3.58	12

5.2 视场重叠比例测量

如图 5 所示,如果以目标从横轴正向沿负向移动,最先看到目标的是侧面子眼 AB,像点由 A

点向 B 点移动,目标继续向左移动;然后是中间子眼 AD,像点由 D 向 A 移动,当侧面 AB 刚好看不到目标时,中间子眼看到的像点假设在 H 位置,那么 DH 就是顶面 AD 与侧面 AB 视场的交叠范围。在实验测量时仍用红色激光模拟目标,让红色激光点在竖直标靶上移动。在测量侧面方向视场时,令像点在水平或竖直方向从一边移动到另一边;在测量角面方向时,令像点在与竖直和水平方向呈 45°方向移动。然后通过复眼系统采集红色像点在各个极限位置时的图像,计算像点的图像位置。实验时拍摄 8 幅图像,每幅图像都是中间子眼与其他 8 个子眼重叠的极限位置。表 2 给出了不同子眼的视场重叠率。

表 2 实验系统不同子眼的视场重叠率

Tab. 2 Overlap rates of fields of view between different eyes

视场重叠率	顶面与侧面	顶面与角面
测量值	0.62	0.61
理论值	0.60	0.58
误差/%	3.33	5.17

从实验结果可以看出:实际测量值与理论值基本一致,表明视场模型是有效的;测量值相对理论值偏大,且角面误差大于侧面误差,这主要是由光纤面板的加工误差以及透镜焦距及安装误差等因素引起的。

参考文献:

- [1] 徐球, 颜树华, 周春雷. 昆虫复眼的仿生研究进展 [J]. 光学技术, 2006, 32(增刊): 10-12.
XU Y, YAN SH H, ZHOU CH L, *et al.*. Advances in bionic study on insects's compound eyes [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(suppl.): 10-12. (in Chinese)
- [2] 陈明君, 刘业胜, 李子昂, 等. 仿生光学复眼设计及其制造技术研究新进展 [J]. 机械工业学报, 2011, 47(1): 161-168.
CHEN M J, LIU Y SH, LI Z A, *et al.*. New research progress in design and manufacture of artificial optical compound eye [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(1): 161-168. (in Chinese)
- [3] 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):

6 结 论

本文研究了基于微端面光纤面板的多孔径视场重叠复眼的视场模型,推导出复眼透镜焦距、光纤面板直径与系统视场角以及各个子眼的视场重叠率、视场重叠距离等参数之间的关系,并进行了复眼成像系统的性能模拟计算和分析。结果表明:镜头的焦距越大,子眼视场重叠率和系统视场就越小;切角增大,子眼间视场重叠率减小,但系统视场会增大;在选择系统透镜焦距与面板切角时,需要综合考虑这两个因素。多孔径复眼成像系统在一定距离外可形成多个子眼同时观测目标的现象,可根据双目视觉原理用任何两个有共同视场的子眼确定目标的空间位置,并通过多眼的联合约束来提高对目标位置及其运动信息的判断。实验结果表明,系统侧面与角面视场角的实测值与理论值的误差分别为 3.58% 和 12%,顶面与侧面和顶面与角面视场重叠所产生的误差分别为 3.33% 和 5.17%。考虑到系统部件的制造和装配误差,可以认为复眼视场模型基本符合实际的多孔径复眼成像系统。

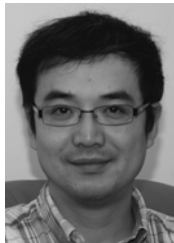
大视场成像以及对运动目标位置和速度信息的敏感度是仿生复眼成像的重要特征,这些特性正是基于复眼系统的子眼视场及视场重叠,因此,本文建立的视场模型对于进一步研究和完善复眼成像理论具有重要意义。

34-46.

- GONG X W, YU W X, ZHANG H X, *et al.*. Progress in design and fabrication of artificial compound eye optical systems [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 34-46. (in Chinese)
- [4] TANIDA J, KUMAGAI T, YAMADA K, *et al.*. Observation module by bound optics(TOMBO): an optoelectronic image capturing system [J]. *SPIE*, 2000, 4089:1030-1036.
- [5] DUPARRE J, DANNBERG P. Micro-optically fabricated artificial apposition compound eye [J]. *SPIE*, 2004, 5301:25-33.
- [6] 金伟其, 林青, 袁溯, 等. 多孔径仿生复眼成像系统技术进展综述 [J]. 光学与光电技术, 2011, 9(6): 9-14.
JIN W Q, LIN Q, QIU S, *et al.*. Summary of ad-

- vances in multi-aperture bionic compound eye imaging system technology [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(6): 9-14. (in Chinese)
- [7] 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. ZHANG H X, LU ZH W, WANG R T, *et al.*. Study on curved compound eye imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 346-350. (in Chinese)
- [8] 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. WANG J, CUI E K. Design of large FOV curved artificial compound eye with freeform lens [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 969-974. (in Chinese)
- [9] LAYCOCK L C, HANDERER V A. Miniature image device for airborne platforms [J]. *SPIE*, 7113: 71130M-8.
- [10] 张笑颜. 多孔径部分重叠仿生复眼成像系统的结构设计和实验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2012. ZHANG X Y. *The Structural Design and Experimental Investigations of Multi-aperture Overlap Bionic Compound Eye* [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [11] 刘军. 多孔径部分重叠仿生复眼成像系统的关键技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2012. LIU J. *Imaging System of Multiple Aperture Overlap Ommateum* [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 刘志刚. 多孔径部分重叠仿生复眼成像系统的成像理论和结构设计 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014. LIU ZH G. *The Imaging Theory Research and Structural Design of Multi-aperture Bionic Superposition Compound Eye* [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] 王小蕾, 王克逸, 曹兆楼. 目标定位仿生复眼视觉系统成像位置计算 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3433-3441. WANG X L, WANG K Y, CAO ZH L, *et al.*. Location of the target image for compound eye system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3433-3441. (in Chinese)

作者简介:



裘 溯 (1973—), 男, 讲师, 硕士生导师, 2003 年、2013 年于北京理工大学分别获得学士、博士学位, 主要从事图像信息处理、光电检测、光电成像技术的研究。E-mail: edmondqiu@bit.edu.cn



倪 宇 (1989—), 男, 硕士, 2015 年于北京理工大学获得硕士学位, 主要从事光电成像与图像处理方向的研究。E-mail: tree_bear@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)