

## 仿生复眼成像系统设计及制作的研究进展

巩宪伟<sup>1,2</sup>, 鱼卫星<sup>1\*</sup>, 张红鑫<sup>3</sup>, 卢振武<sup>3</sup>, 孙强<sup>3</sup>, 沈宏海<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心, 吉林 长春 130033;

4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 基于仿生复眼光学成像系统体积小、重量轻、视场大、灵敏度高优点, 对其研究现状和发展前景进行了综述。简要介绍了生物复眼的结构与分类; 分别从平面型和曲面型仿生复眼成像系统的设计概述了仿生复眼的研究进展, 给出了国内外典型复眼成像系统的结构、模型和成像功能; 总结了仿生复眼成像系统应用于不同领域的特点和优势。最后, 分析了目前仿生复眼的工艺现状, 指出仿生复眼的功能主要受微器件制作工艺的限制, 而超精密加工技术是一种革新的、综合的微细加工方法, 具有制作更高精度透镜阵列, 提高人工仿生复眼应用能力的潜力。

**关键词:** 仿生复眼; 成像系统; 微透镜阵列; 光学设计; 微细加工

中图分类号: TH703; O439 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20130601.0034

## Progress in design and fabrication of artificial compound eye optical systems

GONG Xian-wei<sup>1,2</sup>, YU Wei-xing<sup>1\*</sup>, ZHANG Hong-xin<sup>3</sup>, LU Zhen-wu<sup>3</sup>, SUN Qiang<sup>3</sup>, SHEN Hong-hai<sup>4</sup>

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

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

*3. Opto-electronic Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

*4. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: yuwx@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** This paper overviews the research situation and development prospects of artificial compound eye optical systems on the basis of their advantages of small volumes, light weights, large field-of-view and high

收稿日期: 2012-09-21; 修订日期: 2012-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 90923036, No. 60977041)

sensitivity. It introduces the structures and classification of insects' compound eyes, and describes the research development of artificial compound eyes according to the design of artificial imaging systems with curved and plane surfaces. Then, it gives structures, models and imaging abilities of typical compound eye imaging systems at home and abroad, and summarizes their usages and merits in different fields. Finally, the preparing techniques of artificial compound eyes are analyzed. Analyzed results point out that the functions of compound eye optical systems are dependent on the fabrication of the microelements, the super fine machining is a fine and effective micromachining method and it has the potentials to fabricate higher accuracy lens arrays and improve application abilities.

**Key words:** artificial compound eye; imaging system; micro-lens array; optical system design; microfabrication

## 1 引 言

随着探测器和计算机科学的发展,单孔径光学系统在自动化、图像识别、军事目标探测等领域的表现不尽人意,且受衍射极限等因素的影响,实现小型化越来越难。受启于昆虫复眼体积小、视场角大以及对高速移动物体敏感等优点<sup>[1-2]</sup>,人们提出了人工复眼成像系统。国际上,仿生复眼的研究成果已广泛应用于雷达系统、微型飞行器、舰艇搜索与跟踪系统、精确末制导武器等<sup>[3]</sup>国防科技发展中,这对全球战场环境的日益复杂化起着至关重要的作用;同时这些成果也已经应用于夜视设备、微型复眼相机、运动机器人<sup>[2-7]</sup>等国民经济领域中。

早在 1826 年米勒就提出了复眼的镶嵌理论,1891 年 Exner 又提出了重要的复眼光重叠理论。从上世纪 60 年代开始,人们从解剖学、形态学的角度对蝇眼视觉系统进行结构研究;70 年代,Reichardt 等人开展了通过视觉来引导飞行与追踪等系列行为的实验。20 世纪中后期,在 H. B. Barlow、G. A. Horridge、M. F. Land、Snyder 等学者的不断深入研究下<sup>[4-9]</sup>,人们对复眼的理解也从初期的生物学角度过渡到光学角度。1980 年,美国某研究小组把昆虫复眼信息原理应用于空对地导弹的制导研究,并研制出一次可拍摄 1 329 张高分辨率图片的蝇眼相机<sup>[3]</sup>。上世纪 90 年代,国内外学者开始探索设计仿生复眼成像系统,并根据理论和实验来验证其设计方案<sup>[10-12]</sup>。进入本世纪后,仿生复眼成像系统的研究伴着微细加工技术的不断

断进步而取得了显著进展。

仿生复眼的光学设计分为平面型和曲面型,国内外学者的研究主要以平面型为主。但从人造复眼成像系统的设计过程到获得的实验结果来看,人造复眼仍存在着诸如成像清晰度低、成像死角等缺陷。本文将从平面型和曲面型仿生复眼成像系统的设计综述仿生复眼的研究并概述其应用。

## 2 复眼的结构及分类

昆虫的复眼是由许多个结构与功能相同的小眼通过曲面阵列的形式组合而成,每个小眼截面呈多边形(蝇的复眼截面呈六边形<sup>[5]</sup>)。单个复眼的小眼个数从几十到几万个不等,小眼的数目越多视场就越大,对运动物体的分辨能力就越强。每个小眼的直径在 10 ~ 140  $\mu\text{m}$ ,相邻小眼之间的夹角一般在 1 ~ 4°。与单孔径光学系统相同,小眼的光学系统同样遵守相应的光学规律。复眼的分辨率不高,视距一般是人的 1/60 ~ 1/80,这是由小眼的小尺寸和小数值孔径决定的。然而复眼却有很高的灵敏度<sup>[7,9]</sup>,例如:当一个目标物从眼前闪过,人眼需要 0.05 s 才可辨别物体的模糊轮廓,而蝇眼只需 0.01 s 便能看清其形状大小。此外,呈曲面阵列分布的小眼使得整个复眼具有高达 360°的大视场,。图 1 定性地阐明了单、复眼的视场角和分辨率的对比情况<sup>[13]</sup>。

复眼由外到内分别是屈光器、感光器、隔光器及视觉中枢,其中的小眼又包含了屈光器和感光器。屈光器由晶锥和角膜组成,相当于一个微透

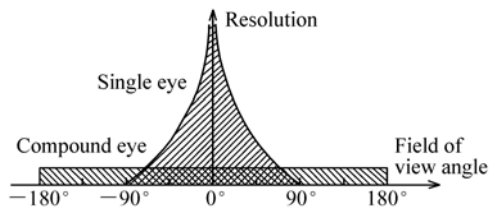


图 1 单眼和复眼的对比

Fig. 1 Comparison between single eye and compound eye

镜;感光器即感杆束,由 8 个与脑的视觉中枢相连的小网膜细胞组成。隔光器位于小眼之间由色素细胞组成,图 2(b)是复眼及其小眼的结构图<sup>[3]</sup>。

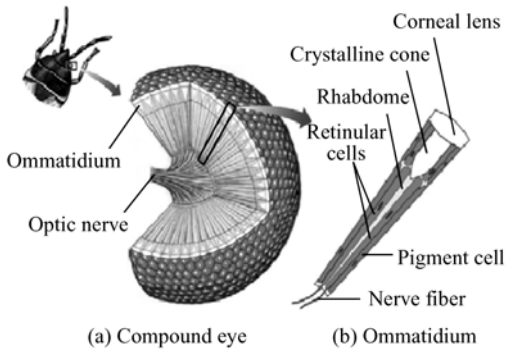


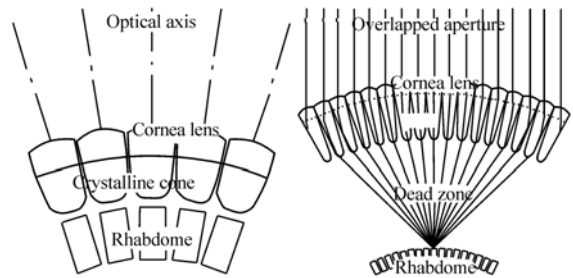
图 2 复眼及其小眼结构

Fig. 2 Composition of compound eye and its ommatidium

根据成像原理不同,复眼分并列型和重叠型两种,其中重叠型复眼又由光学反射重叠、光学折射重叠以及神经重叠三类组成<sup>[14]</sup>。图 3(a)是并列型复眼的示意图<sup>[13]</sup>。这种复眼的特点是:每一感杆束接收的光只是它上面对应的一个小眼的视场范围内的光线。图 3(b)是重叠型复眼的示意图,与图 3(a)的不同之处是:每一感杆束可接收由若干小眼折射过来的光线。

### 3 平面型仿生复眼成像系统的研究进展

2000 年,日本的研究小组在 Tanida J 带领下提出 TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics) 的复眼成像系统<sup>[15-17]</sup>,该系统为平面结构,是以蜻蜓的并列复眼结构原理为参考而设计



(a) 并列型复眼 (b) 折射重叠型复眼

(a) Apposition compound eye (b) Superposition compound eye

图 3 并列型和折射重叠型复眼示意图

Fig. 3 Schematic diagram of apposition compound eye and superposition compound eye

的。系统以微透镜作为光采集组件,以光探测器作为接收组件,各光通道之间通过光隔离层得以分离,获取的信息经计算机数字处理后达到目标像重组。由于采用了普通折射型微透镜阵列,使得系统厚度减小很多,达到了真正意义上的微缩成像。又因为 TOMBO 系统各组件完全分离制作,该系统具有结构紧凑、方便组装、视场大等优点,且便于以后的结构改进。

2004 年,德国研究小组在 JACQUES 带领下提出并制成了同样基于并列复眼设计理念的人造并列复眼成像系统 (Artificial Apposition Compound Eye Objective, APCO)<sup>[18-19]</sup>。在结构上 APCO 与 TOMBO 比较相似,都是平面结构,且它们的成像都是通过把微透镜阵列用于光通道分离的金属孔洞阵列以及光传感器阵列结合来实现的。与 TOMBO 不同的是,APCO 系统的微透镜阵列与孔洞阵列被制作在同一块玻璃基片两侧,而且光传感器阵列与它们紧密相连。系统的平面模型如图 4

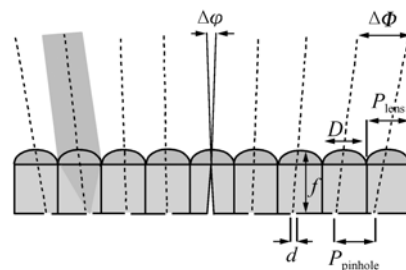


图 4 光学并列复眼平面模型

Fig. 4 Plane model of apposition compound eye



个  $9 \times 9$  的微透镜阵列,其横截面积为  $0.9 \text{ cm} \times 0.9 \text{ cm}$ ,厚度为  $0.7 \text{ mm}$ 。在微透镜阵列后方放置一个 CMOS 相机获取物体的图像信息。由于阵列中每个微透镜都能有效成像,CMOS 相机得到一个  $9 \times 9$  的多重像,最后经数字处理得到重建的像。图 10 为热回流法加工微透镜阵列流程,图 11 是经数字处理后得到的字符“A”的像。

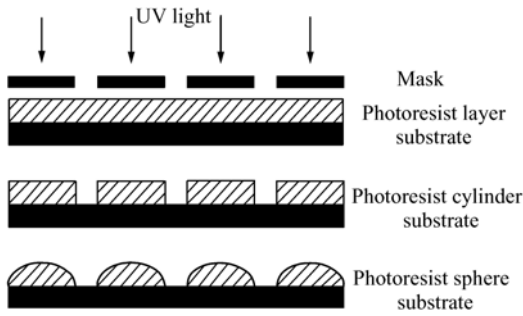


图 10 热回流法加工微透镜阵列流程

Fig. 10 Process for the fabrication of microlens array by photoresist thermal reflow method

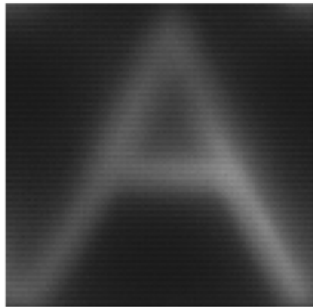


图 11 经数字处理后得到的“A”的像

Fig. 11 Reconstructed image of “A” achieved by digital image processing method

需要说明的是,由于并列复眼中各小眼感杆束和角膜透镜的“一对一”关系,各小眼成像独立,形成“镶嵌像”。因此,以上方案均在相邻小眼间加入屏蔽,以便有效消除相邻小眼接收范围射来光线的干涉,从而使成像效果得到了较大的提高<sup>[25]</sup>。

2004 年 JACQUES 小组提出了基于重叠复眼设计理念的“簇眼”结构<sup>[26-27]</sup>,其成像系统仍是平面结构,3 个不同功能的微透镜阵列(聚焦阵列、场阵列以及中继阵列)构成了系统的主体部分,

且与感光阵列相连。由于 3 个微透镜阵列的排列间隔不同,该系统获得的视场比 APCO 的视场更大。目标物体的光信号依次通过聚焦透镜阵列、中继透镜阵列和传感器阵列,最终获得整个目标物体的正立像<sup>[28]</sup>。图 12 为重叠复眼的简图;图 13(a)为重叠复眼透镜排列形式,图 13(b)为重叠复眼侧视图。

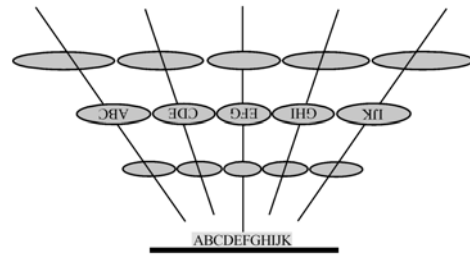
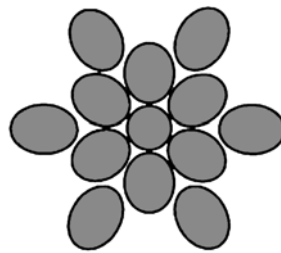
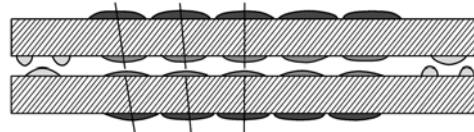


图 12 重叠复眼的简图

Fig. 12 Schematic diagram of superposition compound eye



(a) 排列形式  
(a) Lens array



(b) 侧视图  
(b) Side view

图 13 重叠复眼透镜的排列形式和侧视图

Fig. 13 Lens array and side view of superposition compound eye

复眼厚度为  $1.96 \text{ mm}$ ,视场为  $70^\circ \times 10^\circ$ ,采用了  $21 \times 3$  的透镜阵列。为矫正因斜入射光导致的像散,他们将传统的圆形透镜阵列制作成椭圆形透镜阵列。图 14 是利用该成像系统拍摄的图片。

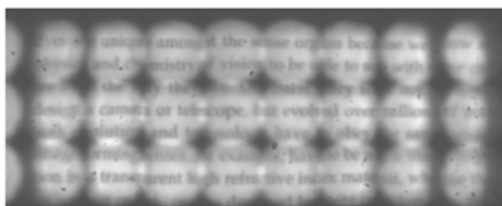


图 14 利用重叠复眼成像系统拍摄的图片

Fig. 14 Images captured by superposition compound eye

### 4 曲面型仿生复眼成像系统的研究进展

2006 年,中科院长春光机所张红鑫等<sup>[29]</sup>针对之前设计的仿生复眼成像系统视场小、边缘成像质量差等缺陷,提出两种曲面型仿生复眼成像系统,即单层曲面与三层曲面成像系统,这是首次在曲面复眼成像系统中引入曲面场镜阵列。他们利用 Lighttools 软件进行了成像系统的建模和光线追迹,设计出的两种系统的体积为  $0.9\text{ mm} \times 0.9\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  与  $0.9\text{ mm} \times 0.9\text{ mm} \times$

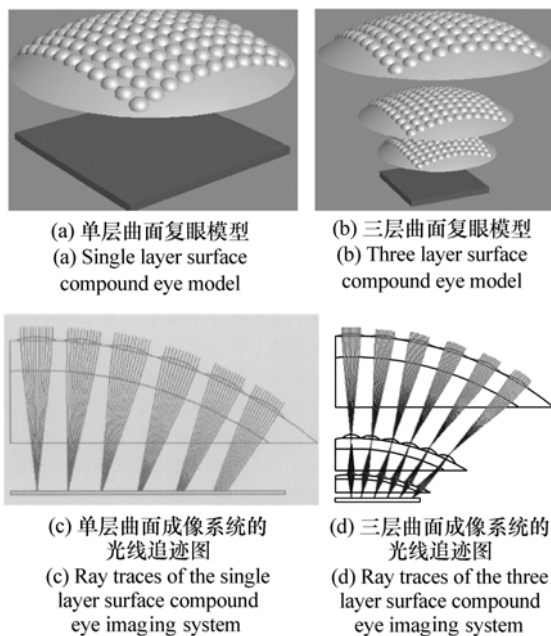


图 15 两种复眼模型和两种成像系统的光线追迹

Fig. 15 Two kinds of compound eye models and their image system ray traces

$0.75\text{ mm}$ ,视场角均达到了  $60^\circ$  与  $88^\circ$ 。采用激光直写法在曲面基底上制作<sup>[30-31]</sup>了曲面复眼透镜阵列。图 15 为两种复眼模型和两种成像系统的光线追迹。

2007 年,德国的 JACQUES 小组在曲面结构上应用并列复眼的设计理念,提出球面仿生复眼成像系统<sup>[32-33]</sup>。图 16 是球面仿生并列复眼系统示意图,由微透镜阵列、孔洞阵列、变换场镜和图像传感器阵列构成。该复眼结构由两部分组成,凸、凹两个透镜构成系统的主体部分。采用曲面激光直写技术将微透镜阵列制作在凹透镜曲面上,金属孔洞阵列被制作在凸透镜表面,微透镜与金属孔洞一一对应。该复眼采用  $112 \times 112$  的透镜阵列,凹、凸球面镜视场分别为  $10.3^\circ \times 10.3^\circ$  和  $31^\circ \times 31^\circ$ ,球面镜直径、针孔直径和微透镜直径分别为  $40\text{ mm}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $120\ \mu\text{m}$ ,图 17 为该系

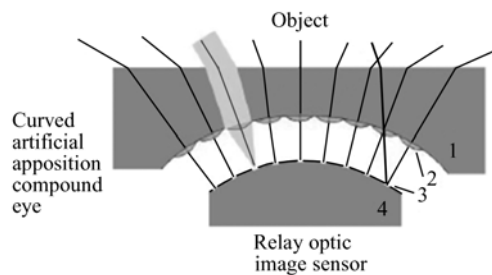


图 16 球面仿生并列复眼

Fig. 16 Technical realization of spherical apposition compound eye objective

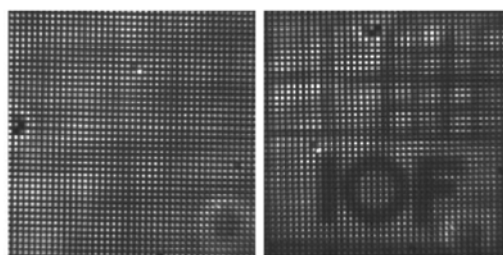


图 17 球面仿生复眼成像系统所成的像

Fig. 17 Sample images by spherical artificial compound eye objective

基于微透镜和自写入聚合物波导<sup>[34]</sup>,2005 年 J. Kim 等人提出了人造“小眼”结构<sup>[35]</sup>,该“小

眼”由三部分组成,分别是人造橡胶微透镜、光敏聚合物波导以及光探测器。其制作过程分两个步骤:首先把带有微透镜的人造橡胶薄膜粘在光敏聚合物的一端,光敏聚合物另一端与光探测器相连。然后用紫外光照射微透镜,在光敏聚合物上形成高折射率的锥体结构。当紫外光强度达到某一极限值后,聚合物会发生聚合而使折射率升高,利用该效应可以在透镜焦点附近形成长度可达衬底(光探测器)的波导结构。因透镜-波导-光探测器伴随着波导结构的形成完成自对准,从根本上解决了装调误差问题。以此为基础,J. Kim 等人一半球曲面上排列多个这种人造“小眼”,得到自对准曲面复眼成像系统<sup>[35]</sup>。图 18(a~c)是人造“小眼”精密加工过程,图 19 为人造小眼的结构<sup>[36]</sup>。

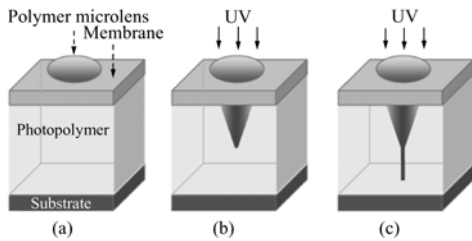


图 18 人造“小眼”的精密加工过程

Fig. 18 Microfabrication procedure of artificial ommatidia

与上述几种仿生复眼成像系统不同,这种自对准的复眼成像系统从根本上解决了因各组件分阶段在同一载体上制作或单独制作后组装而出现的误差<sup>[37]</sup>。

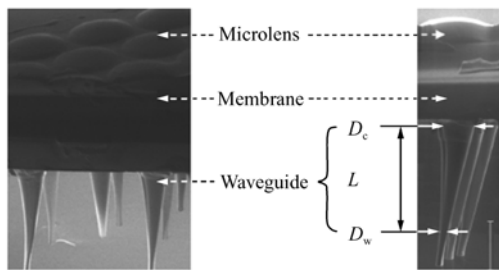


图 19 带有波导结构的人造小眼的电子显微照片

Fig. 19 Pictures of an artificial ommatidium with attached waveguide

近几年又有多位学者提出不同的仿生复眼成

像系统<sup>[38-43]</sup>,其中包括 2011 年墨西哥研究小组提出的应用圆柱形微双合透镜设计的曲面复眼成像系统<sup>[43]</sup>。具有代表性的是 2010 年美国的一个研究小组用超精密加工的方法制造的基于 3D 微棱镜结构的并列复眼成像系统<sup>[44]</sup>,该系统由 3D 微棱镜阵列、小孔阵列和微透镜阵列组成的曲面复眼系统。图 20 所示为 3D 微棱镜阵列的超精密加工流程。

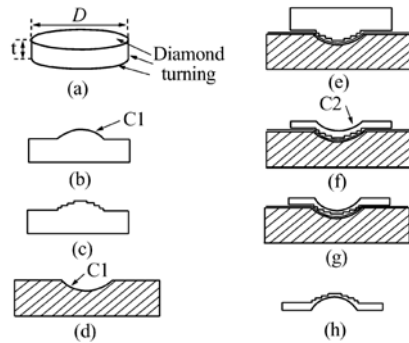


图 20 3D 微棱镜阵列的超精密加工流程

Fig. 20 Ultraprecision machining process for the 3D microprism array

小孔阵列安装于微棱镜阵列与微透镜阵列之间,以消除相邻通道间光线的影响。该系统包含了微棱镜和微透镜在内的 601 个单元微组件,所有组件被组装在半径为 20 mm 的区域内,配置中最大的光入射角是 18.43°。该小组设计了如图 21 所示的 3D 复眼相机结构。

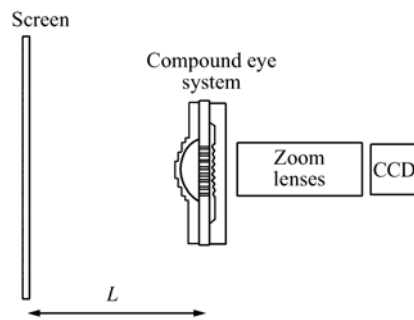


图 21 3D 复眼相机的结构图

Fig. 21 Structure diagram of 3D compound eye camera

### 5 仿生复眼成像系统的应用进展

当前,仿生复眼的研究成果已在国防尖端装

备和民用工业领域内得到广泛应用,如在飞行器前视红外探测、夜视设备以及预警卫星、战略与战术导弹等武器精确制导系统<sup>[44]</sup>,还有大型红外望远镜、微型复眼相机<sup>[45-47]</sup>、微型飞行器及运动机器人、基于视觉的自动导航仪等工程技术领域<sup>[48-49]</sup>。此外,人们致力于拓展仿生复眼成像系统的新功能,以弥补其平面黑白成像的不足。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<sup>[37]</sup>。下面分类对其应用进行阐述:

(1)在导弹精确末制导装置中的应用<sup>[44]</sup>。生物界的昆虫能够实时有效地跟踪和截获目标,其原理是它可以结合复眼及其后神经系统准确、快速地处理视觉信息,及时分析目标物运行信息并实时发放指令,从而校正并控制自身飞行速度与方向。为使导弹可获取目标物的3D信息,可模拟复眼功能,在导弹导引头上用1个成像探测器和2个调制盘构造出一个多模导引系统。这类仿生制导导引头不仅继承了复眼视场大、质量轻、焦距短及体积小的优点,而且还具备高度的容错能力、自适应能力与较强搜索和跟踪能力等特点,可用在紫外光与可见光波段下的复合制导,例如反舰导弹、反坦克导弹、巡航导弹、以及空空导弹与空地导弹等各类导弹的精确末制导。仿生复眼末制导装置的优点使得它在航船、飞机的夜视设备及前视红外探测等方面有广泛应用前景。可以预见,下一代智能武器将用复眼观测目标,复眼成像系统在国内外军事领域将得到越来越多的重视和应用。

(2)在智能机器人的视觉导航装置中的应用<sup>[50]</sup>。由于复眼系统的小体积、大视场、速度可测与重量轻等诸多优势,使其系统不仅可在360°视场范围内监控目标,而且有利于减少系统的体积及承载它的系统所需的能量。仿生复眼探测器收集到的光信息经过该系统的处理,可实现对目标物的识别、测速与跟踪。智能机器人的视觉系统可准确辨别周围环境目标的位置与方向,并能够清晰判断它与目标物的距离,因此可顺利穿行于有障碍物的环境中。很多危险的任务,诸如油

井大火的扑灭、核物质的运输等都可以用安装了仿生复眼的智能机器人来完成。

(3)在微型复眼相机装置中的应用<sup>[47]</sup>。便携式光电子产品的微型化趋势使得仅仅通过缩小系统的机械装置和电子器件已无法满足要求。受生物复眼的启示,人们提出了基于实时视觉的微光学超薄光学系统,设计出微型复眼相机。与传统相机相比其具有体积小、质量轻、视场大、便携等诸多优点。实验证实<sup>[47]</sup>复眼相机可达到视频图形阵列的分辨率,且体型长度比具有相同像素的传统相机小。目前的微纳工艺制造水平,可以实现微透镜阵列的晶圆级制备。2011年10月,Lytro公司推出世界首款光场相机,原理是利用仿昆虫复眼的微透镜阵列,在拍摄的同时记录包括光线方向等大量复杂信息,通过软件对数据解码,实现“先拍摄后对焦”的功能。Lytro强调该相机最重要的不是其成像质量或性能,而是其强大的光场纪录与解码技术。该相机是首个运用光场技术的消费产品,被称为“自摄影发明以来的首次重大变革”。

(4)应用于偏振光导航仪<sup>[47-49]</sup>。受蜜蜂复眼的视觉细胞对偏振光非常敏感的启示,偏振方向略有差异的偏振片排列在仿生复眼的相邻小眼中,将此类仿生复眼望向天空,明暗图案会伴随太阳位置的改变而变化,从而获得光的偏振方向。利用该原理发明的偏振光导航仪很早就应用于航海中,现在已经安装在汽车、微型飞行器、GPS和自由运动的机器人等装置上。

(5)应用于多孔径光学系统装置<sup>[49]</sup>。根据复眼的多孔径光学系统结构的特点,人们设计了一种半球形多孔径光学系统装置。由于该系统具有很大的视场,目标易被搜索,因此在国内外很多重要的装备中都已得到应用。比如在宇宙空间的监测、舰艇搜索和跟踪系统、雷达系统、预警卫星及大型红外望远镜等领域。

(6)应用于彩色成像<sup>[37]</sup>。基于TOMBO系统,Tanida J小组在2004年提出两种实现彩色成像的方案:像素分色与单元分色。该方案通过把不同波长的滤波器加在微透镜阵列之后来实现。像素分色是指TOMBO中所有单元的滤波器排列



方式相同且每个单元中不同颜色的滤波器用于相邻像素;单元分色是指相邻单元采用不同颜色滤波器且每个单元采用同种颜色滤波器。两种方案各有所长:采用单元分色法,与成像器件相连的彩色滤波器易于制作,并可放宽成像条件;采用像素分色法,成像器件可以直接选择已商品化的彩色 CCD。

(7)应用于指纹与信用卡识别<sup>[37,27]</sup>。Tanida J 小组在 2004 年提出基于 TOMBO 的指纹识别系统。在已有的 TOMBO 中增加光导盘(用于手指定位),并引入专用的发光组件,把手指置于光导盘表面,然后用光源照射待测手指就可实现指纹提取。与传统 TOMBO 系统的区别是,用于指纹识别的 TOMBO 系统要实现近距离的指纹信号的聚焦,且最后提取结果是对复合像经过一系列处理得到的。2005 年德国科学家又研制了一种厚度仅有 0.4 mm 的人工复眼成像系统<sup>[25]</sup>,将该系统与一影像分析装置连接在一起,并粘附于银行卡上,当消费者使用银行卡时就可以显示持卡人,从而防他人盗用。

(8)全视角成像功能。2007 年,德国的 JACQUES 小组实现了基于仿生并列复眼的全视角成像系统<sup>[50]</sup>。将可旋转的机械轴应用于该系统,即可通过机械轴的转动来实现微透镜对各视角光信息的采集,各视角收集的像片段连接起来就可完成全视角成像。这类结构比较简单的全视角成像系统,可达到平面仿生并列复眼的体积水平,特别适用于微小孔洞探测和医疗内窥镜等方面。

## 6 结束语

经过几十年的研究,学者们已经充分认识了复眼的结构及其工作原理,也制造出许多人工复眼并应用于设计的光学系统,但是由于目前在微光学加工工艺、装调水平、后期的数据融合以及信息处理等方面的种种限制<sup>[45]</sup>,现有的人工复眼结构还比较简单、粗糙,与生物复眼的功能相比差距甚大。

当前,毫米级以下的仿生复眼只能达到平面型水平。这是由于制备仿生复眼的关键是微透镜

的制造,而受工艺水平的限制,微透镜阵列的制作大多停留在平面型的水平。用于制作平面微透镜阵列的方法通常有离子交换法、光敏玻璃热成形法<sup>[35]</sup>、光刻胶热熔法<sup>[22]</sup>、光电反应刻蚀法、聚焦离子束刻蚀与沉积法<sup>[30-31]</sup>等,这些微细加工方法,可控性较差,难以保证微透镜阵列形状精度。平面型微透镜阵列的仿生复眼,相对曲面而言视场小且透镜边缘成像质量差。曲面型仿生复眼虽具有视场大等诸多优点,但目前透镜曲面阵列形成的人工复眼中,单个透镜尺寸很难达到毫米量级以下,且曲面阵列多数采用分别制作单个透镜再拼接的方法,过程复杂且装调困难,也妨碍了它的进一步小型化。不过,当前超精密加工技术已用来加工 3D 透镜和中尺度光学结构,这是一种革新的、综合的微细加工方法,可制作精度更高的微透镜阵列并应用于仿生复眼成像系统中。与其它微细加工方法相比,超精密加工能够生产出覆盖大小特征尺寸更精密的结构和更好的表面抛光,更重要的是能够加工出真正的 3D 微透镜和微棱镜结构,且在单一编排中能加工整个光学结构,而无需重复再加工。现在超精密加工技术在自由曲面加工方面越来越成熟,可实现的制造精度越来越高,在自由曲面加工中实现了的变切深切削、尺寸一致、表面粗糙度小、可控性强及加工精度高等一系列优点。该技术在光学遥感、视觉研究和许多光学和光电子学的应用上有很大的潜力,受到越来越多的关注。最近,国内哈尔滨工业大学精密研究所已在曲面超精密加工方面开展了深入的研究,并取得了一定的研究成果<sup>[3]</sup>。

目前,人工仿生复眼虽然仍存在一些棘手的问题,但发展速度和获得的成果已受到广泛重视,许多科技人员还在复眼的理论研究和实用方面做了大量的工作。人工复眼集生物学、光学、电子学、信息处理、数据融合、自动控制等多个学科为一体,已成为具有创新性、边缘性、交叉性的前沿研究领域<sup>[43]</sup>,这一领域还有很大的发展空间有待科技工作者们去研究探索。相信随着社会的发展和科技的进步,通过国内外学者潜心研究、不断努力,人工仿生复眼会有更光明的前景。

## 参考文献:

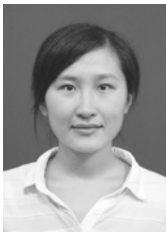
- [1] HORRIDGE G A. The compound eye of insects[J]. *Scientific American*,1977,237:108-120.
- [2] LAND M F. Compound eyes:old and new optical mechanisms[J]. *Nature*,1980,287:681-686.
- [3] 陈明君,刘业胜,李子昂,等. 仿生光学复眼设计及其制造技术研究新进展[J]. *机械工程学报*,2011,47(1):161-168.  
CHEN M J,LIU Y SH,LI Z A,*et al.*. New research progress in design and manufacture of artificial optical compound eye [J]. *J. Mechanical Eng.*,2011,47(1):161-168. (in Chinese)
- [4] SNYDER A W. Acuity of compound eyes:physical limitations and design[J]. *J. Comp. Physiol*,1977,116:161-182.
- [5] BRLOW H B. The size of ommatidia in apposition eyes[J]. *Experimental Biology*,1952,29(4):667-674.
- [6] LAND M F. Superposition images are formed by reflection in the eyes of some oceanic decapod crustacea[J]. *Nature*,1976,263:764-765.
- [7] HORRIDGE G A. The separation of visual axes in apposition compound eyes[J]. *Philosophical Transactions Royal Society London B*,1978,285:1-59.
- [8] HORRIDGE G A. The evolution of visual processing and the construction of seeing systems[J]. *Proceedings of the Royal Society of London B*,1987,230:279-292.
- [9] LAND M F,STAVENGA G A,HARDIE R C. *Variations in the Structure and Design of Compound*[M]. New York:Springer Verlag,1989:90-111.
- [10] OGATA S,ISHIDA J,SASANO T. Optical sensor array in an artificial compound eye[J]. *Opt. Eng.*,1994,34(11):3649-3655.
- [11] SANDERS J S,HALFORD C E. Design and analysis of apposition compound eye optical sensors[J]. *Opt. Eng.*,1995,34(1):222-235.
- [12] HAMANAKA K,KOSHI H. An artificial compound eye using a microlens array and its application to scale invariant processing[J]. *Opt. Rev.*,1996,(3):264-268.
- [13] 张红鑫,卢振武,李凤有. 人工仿生复眼的研究进展[J]. *长春理工大学学报*,2006,29(2):4-7.  
ZHANG HX,LU ZH W,LI F Y. The research progress of artificial compound eye[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*,2006,29(2):4-7. (in Chinese)
- [14] LAND M F. *Handbook of Sensory Physiology*[M]. New York:Springer Verlag,1981.
- [15] 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.
- [16] TANID J,KITAMURA Y,YAMADA K,*et al.*. Compact image capturing system based on compound imaging and digital reconstruction[J]. *SPIE*,2001,4455:34-41.
- [17] TANID J,KITAMURA Y,YAMADA K,*et al.*. Thin observation module by bound optics(TOMBO):concept and experimental verification[J]. *Appl. Opt.*,2001,40(10):1806-1813.
- [18] DUPARRE J,DANNBERG P. Micro-optically fabricated artificial apposition compound eye[J]. *SPIE*,2004,5301:25-33.
- [19] TUDELA R,BRUCKNER A,DUPARRE J,*et al.*. An image restoration approach for artificial compound eyes[J]. *SPIE*,2008,6812:681200.
- [20] DUPARRE J,WIPPERMANN F,PETER D,*et al.*. Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence[J]. *Opt. Express*,2005,13(26):10539-10551.
- [21] WIPPERMANN F,DUPARRE J,PETER S,*et al.*. Design and fabrication of a chirped array of refractive ellipsoidal microlenses for an apposition eye camera objective[J]. *SPIE*,2005,5962:59622C.
- [22] WIPPERMANN F,DUPARRE J,PETER S. Applications of chirped microlens arrays for aberration compensation and improved system integration[J]. *SPIE*,2006,6289:682915.
- [23] BRUCKNER A,DUPARRE J,BRAUER A. Advanced artificial compound-eye imaging systems[J]. *SPIE*,2008,6887:

688709.

- [24] DI S, LIN H, DU L X. An artificial compound eyes imaging system based on MEMS technology[C]//ROBIO'09 Proceedings of the 2009 International Conference on Robotics and Biomimetics, Dec 19-23, 2009, Guilin, China, 2009.
- [25] DUPARRE J, WIPPERMANN F. Microoptical artificial compound eyes-from design to experimental verification of two different concepts[J]. *SPIE*, 2005, 5962:59622A.
- [26] DUPARRE J, SCHREIBER P, UOLKEL R. Theoretical analysis of an artificial superposition compound eye for application in ultra flat digital image acquisition devices[J]. *SPIE*, 2004, 5249:408-418.
- [27] DUPARRE J, SCHREIBER P, MATTHES A, *et al.*. Microoptical telescope compound eye[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(3):889-903.
- [28] JACQUES D, PETER D, PETER S, *et al.*. Artificial apposition compound eye fabricated by micro-optics technology[J]. *Appl. Optics*, 2004, 43(22):4303-4310.
- [29] 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):346-349.  
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):346-349. (in Chinese)
- [30] LI F Y, LU ZH W, LI H J. Binary laser direct writing system and its applications[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(5):451-454.
- [31] X Y J, LU ZH W. Lithographic fabrication of large curved hologram by laser writer[J]. *Opt. Express*, 2004, 12:1810-1814.
- [32] DUPARRE J, RADTKE D, TUNNERMANN A. Spherical artificial compound eye captures real images[J]. *SPIE*, 2007, 6466:64660K.
- [33] RADTKE D, DUPARRE J, ZEITNER U D, *et al.*. Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(6):3067-3077.
- [34] SHOJI S, KAWATA S, SUKHORUKOV A A, *et al.*. Self-written waveguides in photopolymerizable resins[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(3):185-187.
- [35] KIM J, JEONG K H, LEE L P. Artificial ommatidia by self-aligned microlenses and waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(1):5-7.
- [36] JEONG K H, KIM J, LEE L P. Biologically inspired artificial compound eyes[J]. *Science*, 2006, 312:557-561.
- [37] 邱思, 徐洪奎, 杜如虚. 人造复眼成像系统研究的新进展[J]. *光学与光电技术*, 2008, 6(4):94-96.  
DI S, XU H K, DU R X. New progress of artificial compound eye imaging systems[J]. *Optics Optoelectronic Technology*, 2008, 6(4):94-96. (in Chinese)
- [38] HORISAKI R, NAKAO Y, TOYODA T, *et al.*. A thin and compact compound-eye imaging system incorporated with an image restoration considering color shift, brightness variation, and defocus[J]. *Opt. Rev.*, 2009, 16:241-246.
- [39] HIURA S, MOHAN A, RASKAR R. Krill-eye; superposition compound eye for wide-angle imaging via GRIN lenses [C]//IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV 2009, Sept 27-Oct 4, 2009, Kyoto Japan, 2009.
- [40] ZHANG Y F, DUA J L, SHI L F, *et al.*. Artificial compound-eye imaging system with a large field of view based on a convex solid substrate[J]. *SPIE*, 2010, 7848:78480U.
- [41] RYOICHI H, KEIICHIRO K, YOHSUZUMI N, *et al.*. Irregular lens arrangement design to improve imaging performance of compound-eye imaging systems[J]. *Appl. Physics Express*, 2010, 3(2):022501.
- [42] RAMON P C, MICHAL, DOBRZYNSKI, *et al.*. Urvace Curved artificial compound eyes[C]//Proceedings of the 2nd European Future Technologies Conference and Exhibition, May 4-6, 2011, Budapest, Hungary, 2011.
- [43] ANEL G R, FRANCISCO J C. Design of artificial apposition compound eye with cylindrical micro-doublets[J]. *Opt Review*, 2011, 18(1):184-186.
- [44] LI L, ALLEN Y Y. Development of a 3D artificial compound eye[J]. *Opt. Express*, 2010, 18:18125-18137.
- [45] KO H C, MARK P S, SONG J ZHOU, *et al.*. A hemispherical electronic eye camera based on compressiblesilicon optoe-

- lectronics[J]. *Nature*,2008,454:748-753.
- [46] BRUCKNER A,DUPARRE J,LEITEL R,*et al.*. Thin wafer-level camera lenses inspired by insect compound eyes[J]. *Opt. Express*,2010,18:24379-24394.
- [47] KAGAWA K,TANAKA E. Deep-focus compound-eye camera with polarization filters for 3D endoscopes[J]. *SPIE*,2010,8227:822714.
- [48] SERRES J,DRAY D,RUFFIER F,*et al.*. A vision-based autopilot for a miniature air vehicle:joint speed control and lateral obstacle avoidance[J]. *Auton Robots*,2008,25:103-144.
- [49] 许琰,严树华,周春雷,等. 昆虫复眼的仿生研究进展[J]. *光学技术*,2006(32):10-12. XU Y,YAN SH H,ZHOU CH L,*et al.*. Advances in bionic study on insects' compound eyes[J]. *Optical Technique*,2006(32):10-12. (in Chinese)
- [50] DUPARRE J,RADTKE D,BRUCKNER A,*et al.*. Latest developments in microoptical artificial compound eyes;a promising approach for next generation ultra-compact machine vision[J]. *SPIE*,2007,6503:1-12.

#### 作者简介:



巩宪伟(1987—),女,山东济南人,硕士,2010年于潍坊学院获得学士学位;2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事生物复眼的复制、仿生复眼成像系统的设计等方面的研究。E-mail:zhoubian0927@163.com



卢振武(1955—),男,吉林人,研究员,博士生导师,1982年于东北师范大学获得学士学位,1985年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事波动光学、太阳能应用、新型光学系统及其在空间的应用等方面的研究。E-mail:luzw@ciomp.ac.cn



鱼卫星(1975—),男,陕西临潼人,博士后,研究员,博士生导师,1998年于西北工业大学获得学士学位,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位。2004年于新加坡南洋理工大学获博士学位。主要从事亚波长光学、微/纳光学、微细加工技术、三维微纳加工技术等方面的研究。E-mail:yuwx@ciomp.ac.cn



孙强(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,主要从事现代红外光学仪器方面的研究。E-mail:sunq@ciomp.ac.cn



张红鑫(1978—),男,河北邯郸人,博士,副研究员,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学设计,衍射光学,光学加工等方面的研究。E-mail:firsthongxin@163.com



沈宏海(1976—),男,江苏东台人,博士,副研究员,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空光电测量领域的研究。E-mail:shenhh@ciomp.ac.cn