

人工仿生复眼的研究进展

张红鑫^{1,2}, 卢振武¹, 李凤有¹

(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, 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 人工仿生复眼的发展历史虽然时间不长, 但由于它具有体积小、重量轻、视场大、灵敏度高优点, 已经引起了人们的广泛重视, 成为新的研究热点。本文介绍了复眼的研究历史, 详细阐述了人工仿生复眼系统的最新研究进展及其在各个领域中的应用状况和应用前景, 分析了目前人工复眼研制中存在的问题, 并提出了改进的方法。

关键词: 并列型复眼; 重叠型复眼; 微透镜阵列; 激光直写

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9870 (2006) 02-0004-04

The Research Progress of Artificial Compound Eye

ZHANG HongXin^{1,2}, LU Zhenwu¹, LI Fengyou¹

(1. State Key Laboratory for Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: With the advantages of small volume, light weight, large FOV, high sensitivity, the artificial compound eye system has got more and more attention, and becomes a new research hot topic. In this paper, the history of the compound eye system was described; the new progress and the applications of the artificial compound eye system were discussed detailedly; the problem of the fabrication process was analyzed, and the method to make progress was put forward.

Key words: apposition compound eye; superposition compound eye; microlens array; laser direct write system

现今光学成像系统的应用领域越来越广, 人们对其要求也不断提高。如智能武器、智能机器人视觉系统和微型飞行器等, 期望整个系统的重量轻、体积小、视场大以及对运动目标更加敏感。但是近年来, 使系统的机械装置和电子器件进一步小型化、轻量化已经变得越来越困难; 或者说, 人们已经感觉到了这两方面的极限。由此, 许多科学家把目光转向了系统的光学部分, 考虑如何将系统的光学组件小型化, 从而使整个系统的体积和重量下降。

受到动物界昆虫复眼的启发, 人们结合复眼的体积小、重量轻、视场大等优点, 提出了相应的人

工复眼光学系统。具体说来, 就是将目前广泛使用的单孔径光学系统用多孔径光学系统所代替, 从而达到使整个系统小型化、轻量化、以及视场增大的目的。

众所周知, 昆虫的复眼是由许多尺寸很小的小眼组成, 这些小眼用肉眼很难分辨, 所以, 人们对复眼的认识是从光学显微镜问世后才开始的。早在 1964 年, 意大利科学家 Hodierna 在他所著的《Locchio della mosca》一书中, 就把复眼描绘成草莓的形状^[1]。随着科技的进步, 人们对复眼的认识也逐步深入, 到了 20 世纪中后期, 随着 H. B. Barlow、M. F. Land、G. A. Horridge、Snyder

收稿日期: 2006-02-23

基金项目: 国家自然科学基金 (60577004)

作者简介: 张红鑫 (1978-), 男, 河北省邯郸市人, 博士研究生, 研究方向: 微光学加工, E-mail: firsthongxin@163.com。

等人的不断研究^[2-12],人们对复眼的认识也从早期的生物学角度转变为从光学的角度进行理解。复眼的体积小、重量轻、视场大、灵敏度高等优点对于科学家们有着巨大的诱惑力,于是,进入20世纪90年代后,科学家们先后制造出了许多人工复眼光学系统,并将其应用于许多领域^[13]。虽然受到目前的光学微细加工工艺水平和装调水平的限制,人工复眼光学系统在功能上还与昆虫的复眼相比,但是由于某些出众的优点,还是在国民经济以及国防科技中起到了不可忽视的作用。相信随着科技水平的不断发展,人工复眼一定会有更加光明的应用前景。

1 复眼的结构与分类

昆虫的复眼是由许多个小眼以曲面阵列的形式组合而成的,小眼的个数从几百个到几万个不等。每个小眼的直径从 $10\mu\text{m}$ ~ $50\mu\text{m}$ 不等,相邻的小眼之间的夹角一般为 1° ~ 4° 。每个小眼的光学系统与单孔径光学系统一样,也符合相应的光学规律。由于小眼的尺寸很小,数值孔径很小,使复眼的分辨率不高,或者说,它是“近视眼”,但是它却有很高的灵敏度^[6,12]。例如:当一个物体在眼前闪过,人类的眼睛需要0.05秒的时间才能看清目标的模糊轮廓;而苍蝇只要0.01秒就能辨别其形状大小。另外,由于小眼呈曲面阵列分布,使复眼有很大的视场角,几乎可以达到 360° 的全视场。图1定性的说明了复眼与单眼在分辨率与视场两方面的对比情况。

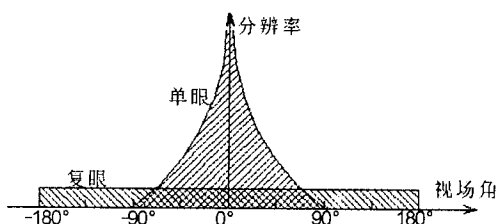


图1 复眼与单眼的比较

Fig.1 The comparison between compound eye and single eye

在过去的100多年中,生物学家们在生物界中发现了许多种不同的复眼结构^[11],但是主要有并列型复眼和重叠型复眼两种。

图2是并列型复眼的示意图。其中,a是复眼中各个小眼的视轴,即光轴;b为角膜透镜部分;c为晶锥部分,d为作为光接收器的感杆束。每一个小眼都有其视场范围,外界的光线通过角膜透镜和晶锥部分后传向感杆束(光接收器),进入视觉神经系统。这种复眼的特点是每一个感杆束接收的

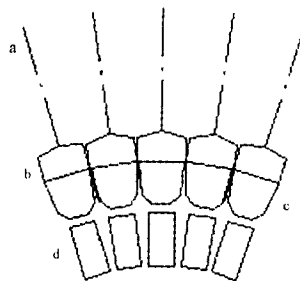


图2 并列型复眼示意图

Fig.2 The schematic diagram of apposition compound eye

光只是它上面对应的一个角膜透镜的视场范围内的光线。可以形象的说成是“一对一”的关系。

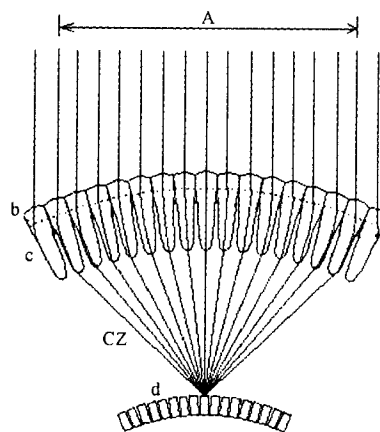


图3 折射型重叠复眼截面图

Fig.3 The schematic diagram of superposition compound eye

图3是重叠型复眼的示意图。其中,A为重叠孔径;b为角膜透镜部分;c为晶锥部分,d为作为光接收器的感杆束;CZ是空区,也被称为透明区。与图2的区别在于每个小眼后面对应的感杆束可以接收到若干个小眼折射过来的光线。换句话说,每一个光接收器可以接收到它上面对应的多个角膜透镜的视场范围内的光线。可以形象的说成是“多对多”的关系。

2 人工仿生复眼及其应用

仿照复眼的结构,人们用将多个小透镜阵列排列的方法制造出了人工复眼,由于重叠型复眼的结构复杂,人工复眼多为并列型。作为一种多孔径的光学成像系统,人工复眼可以完成许多单孔径光学成像系统无法完成的工作,当前人工复眼的应用主要集中在以下几个方面。

(1) 由平面微透镜阵列组成的人工复眼光学系统可以应用到平板印刷术中^[13],可以实现非接触式平板印刷,使其拥有更大的聚焦深度、更长的工作距离和更大的印刷面积。日本的Jun Tanida等在2000年提出了一种基于蜻蜓的复眼结构设计的

TOMBO (thin observation module by bound optics) 小型成像系统^[14]。这个系统首先获取分离的单元像, 然后对单元像的几何参数进行估算, 由所得的几何参数把像定位于屏上, 在各个像素之间进行查值, 再用高通滤波器完成最后的像。该系统具有结构紧凑, 方便组装, 视场大等优点。最近, 德国科学家制造了一种厚度仅为 0.4mm 的人工复眼成像系统^[15], 视场角可以达到 $70^\circ \times 10^\circ$ 。系统具有多个成像通道, 每个通道按照自己的视角进行成像, 然后在像面组合成完整的像。科学家们已经把该系统与一个影像分析装置相连接, 并贴附在银行卡上。这样, 银行卡在被使用时就可以“看到”持卡人, 从而防止被陌生人盗用。

(2) 在智能机器人视觉系统中, 人工复眼光学系统也得到了广泛的应用。由于复眼系统具有体积小, 重量轻, 视场大等优点, 使其有利于减少承载它的系统所需的能量, 也有利于减少系统的体积, 同时可以在 360° 视场范围内监控目标。系统通过对人工复眼探测器所收集到的外界信息进行处理, 可以实现对目标的识别、跟踪、测速。通过实验, 可以使智能机器人“自己”躲避开周围的障碍物^[21,22], 还可以控制一支乒乓球拍, 使其准确地打到飞行中的乒乓球^[23]。

(3) 人工复眼系统还应用到了导弹的导引装置中。昆虫可以利用复眼以及后面的神经系统快速、准确地处理视觉信息, 实时的计算出前面目标的方位及速度, 同时发出指令, 控制并校正自己的飞行方向和速度, 以便跟踪和截获目标^[15]。模仿复眼的功能, 利用两个调制盘与一个成像探测器, 构造一个在导弹导引头上的多模导引的应用, 使导弹能够获得目标的三维空间位置信息^[16]。再加之复眼系统大视场的特点, 使人工复眼系统在导弹的导引装置中有很高的应用价值, 在国内外军事领域都得到了广泛的重视。日本还研制了采用光纤红外诱导技术的 96 式复眼导弹, 我国也研制了光学复眼式双红外末制导导引装置。

(4) 利用复眼系统的特点, 人们还设计了两级复眼式准分子激光微加工均束器^[27]; 并提出了利用复眼透镜实现二维图象光学信息编码和译码的技术原理^[28]; 还将光学复眼应用到了激光敌我识别的系统当中^[29]; NASA 还研制了一种复眼型 GPS 姿态传感器, 它由六个天线组成, 可以从多个方向分别收集到不同的 GPS 卫星的信号, 通过数据处理, 可以准确的进行位置及其姿态的定位。

3 人工仿生复眼中存在的问题

虽然复眼的结构及其工作原理已经很清楚了, 人们也制造出了许多人工复眼, 并且在不同的领域中得到应用, 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, 现在的人工复眼结构还比较简单、粗糙, 与昆虫复眼的功能相比还有很大的差距。

目前将透镜曲面阵列形成的人工复眼中, 单个透镜的尺寸还无法达到毫米量级以下, 这种曲面阵列多数采用分别制作单个透镜小眼, 然后再将其拼接的方法来制作。这样就使得制造过程很复杂, 而且装调也十分困难, 也妨碍了其进一步小型化。尺寸在毫米量级以下的人工复眼结构目前都是平面阵列的, 其中的微透镜阵列多是采用光刻胶热熔的方法来制造^[30], 这样就对大视场的实现形成了很大的障碍。有些结构也只是用平面阵列的场镜来扩大视场^[31], 一方面, 这样得到的视场无法与曲面阵列得到的大视场相比; 另一方面, 也使得边缘视场的成像质量大大下降。另外, 折射重叠型复眼有更高的光能量利用率和更高的灵敏度, 但是由于其结构比较复杂, 再加上各种工艺水平的限制, 人工复眼目前还很少有重叠型的。

长春光机所自主研制的激光直写设备已经开展了曲面衍射光学元件的研制工作, 并取得了显著的成果^[31-34]。该设备的一个显著特点是有可以上下移动的 Z 轴, 可以在光刻过程中始终将激光光束聚焦在曲面基底上。利用这一特点, 可以使在曲面上制造微透镜阵列成为可能。目前, 相关的原理试验正在进行中。

4 展望

人工仿生复眼的发展历史虽然时间不长, 但是已经引起了人们的广泛重视, 许多科技工作者已经在复眼的理论研究和实用方面做了大量的工作。人工复眼是集生物学、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, 具有创新性、边缘性、交叉性的前沿研究领域。虽然目前还存在着一些的问题, 但是这并不妨碍人工复眼在国民经济以及国防科技中得到广泛的应用; 同时也说明在这一领域还有很大的潜力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, 通过广大科技工作者不断努力, 潜心研究, 一定会使人工复眼拥有更加光明的应用前景。

参考文献

- [1] Hodierna D G. Locchio della mosca[M]. Decio Cirillo, Palermo, 1964.
- [2] Barlow H B. The size of ommatidia in apposition eyes[J]. Experimental Biology, 1952, 29(4): 667 - 674.
- [3] Land M F. Superposition images are formed by reflection in the eyes of some oceanic decapod crustacea[J]. Nature, 1976, 263: 764 - 765.
- [4] Horridge G A. Fly photoreceptors111. Angular sensitivity as a function of wavelength and the limits of resolution[J]. Proceedings of the Royal Society of London B, 1976, 194: 151 - 177.
- [5] Horridge G A. The compound eye of insects[J]. Scientific American, 1977, 237: 108 - 120.
- [6] Horridge G A. The separation of visual axes in apposition compound eyes[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, 1978, 285: 1 - 59.
- [7] Land M F. The optical geometry of euphausiid eyes[J]. Journal of Comparative Physiology A, 1979, 130(1): 49 - 62.
- [8] Horridge G A. Apposition eyes of large diurnal insects as organs adapted to seeing[J]. Proceedings of the Royal Society of London B, 1980, 207: 287 - 309.
- [9] Land M F. Compound eyes: old and new optical mechanisms[J]. Nature, 1980, 287: 681 - 686.
- [10] 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.
- [11] Land M F. Variations in the Structure and Design of Compound[M]. Facets of Vision, D. G. Stavenga and R. C. Hardie, editors, 1989, Chap. 3: 30 - 73.
- [12] Land M F. Variations in the Structure and Design of Compound[M]. Facets of Vision, D. G. Stavenga and R. C. Hardie, editors, 1989, Chap. 5: 90 - 111.
- [13] Reinhard Volkel. Microlens array imaging system for photolithography[J]. Optical Engineering, 1996, 35(11): 3323 - 3330.
- [14] Jun Tanida. Thin observation module by bound optics (TOMBO): an optoelectronic image capturing system[A]. Optics in computing, R. A. Lessard and T. Galstian, eds., Proc. SPIE, 2000, 4089: 1030 - 1036.
- [15] Jacques Duparre. Microoptical telescope compound eye[J]. Optics express, 2005, 13(3): 889 - 903.
- [16] Jeffrey S. Sanders. Design and analysis of apposition compound eye optical sensors[J]. Optical Engineering, 1995, 34(1): 222 - 235.
- [17] Franceschini N. From insect vision to robot vision[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, 1992, 337: 283 - 294.
- [18] Fabrizio Mura. Visual control of altitude and speed in a flying agent[J]. Animals to Animats111, D. Cliff, P. Husbands, J. A. Meyer, and S. Wilson, editors, 1994: 91 - 99. MIT Press.
- [19] Shiro Ogata. Optical sensor array in an artificial compound eye[J]. Optical Engineering, 1994, 33(11): 3649 - 3655.
- [20] Horridge G A. What can engineers learn from insect vision[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, 1992, 337: 271 - 282.
- [21] Gert Stange. Rangefinder based on intensity gradient measurement[J]. Applied Optics, 1991, 30(13): 1695 - 1700.
- [22] Nicolas Martin. Obstacle avoidance and speed control in a mobile vehicle equipped with a compound eye[J]. Intelligent Vehicles, I. Masaki, editor, IEEE, 1994: 381 - 386.
- [23] Luid R, Lopez. Neural processing and control for artificial compound eyes[J]. IEEE International Conference on Neural Networks, 1994, 5: 2749 - 2753.
- [24] Yakovlev A. A micro - sensor based on insect vision. Computer Architecture for Machine Perception Workshop[J], IEEE 1993: 137 - 146.
- [25] 吴梅英. 复眼光学及其在国民经济中的应用[J], 量子电子学, 1995, 12: 418 - 419.
- [26] 芦丽明. 蝇复眼在导弹上的应用研究[J], 红外技术, 2001, 2: 9 - 11.
- [27] 李呈德. 两级复眼式准分子激光微加工均束器的设计[J]. 中国激光, 1999, 26: 560 - 564.
- [28] 吴梅英. 复眼透镜光学信息保密编码及译码的研究[J]. 生物物理学报, 1991, 7: 146 - 151.
- [29] 尹福昌. 激光敌我目标识别[J]. 光学精密工程, 1994, 2: 36 - 40.
- [30] Eisner M. Making diffraction limited refractive microlenses of spherical and elliptical form[A], Microlens Arrays, EOS Topical Meeting Digest Series, M. C. Hutley, ed., 13, (Nat. Phys. Lab. Teddington, 1997): 39 - 41.
- [31] LI Feng - you. Binary Laser Direct Writing System and Its Applications[J]. 光学精密工程, 2001, 5: 451 - 454.
- [32] 李凤有. 极坐标激光直写系统原点定位的试验研究[J]. 光子学报, 2004, 33: 1163 - 1165.
- [33] 李凤有. 激光直写光刻中线条轮廓的分析[J]. 光子学报, 2004, 33: 136 - 139.
- [34] Yongjun Xie, Zhenwu Lu. Lithographic fabrication of large curved hologram by laser writer[J]. Opt. Express, 2004, 12: 1810 - 1814.