

文章编号:1672-3392(2008)04-0093-04

人造复眼成像系统研究的新进展

邸 思 徐洪奎 杜如虚

(中科院深圳先进技术研究院精密工程中心, 广东 深圳 518067)

摘要 人造复眼成像系统具有体积小、功耗低、视角范围广等优点,是一种应用前景非常广阔的光成像系统。综述了人造复眼成像系统的研究背景及最新的研究进展,其中包括基于不同仿生设计理念的各种新型人造复眼结构以及能够实现诸如彩色成像、指纹识别、全视角成像等新功能的实验系统;展望了人造复眼成像系统今后的研究方向。

关键词 人造复眼; 微缩成像系统; 微透镜阵列; 光探测阵列

中图分类号 O439 **文献标识码** A

1 引言

小型化的成像系统具有低能耗、大视角的优点以及在体积上的显著优势,因而越来越受到人们的青睐,其应用前景十分广阔。目前在手机、个人电脑上已经有所应用,将来甚至可能应用在诸如信用卡等更小物体上,这为成像系统的体积提出了更高的要求,希望能从小型化过渡到微型化。由于受到衍射极限等因素的影响,在传统的单孔径成像结构下,通过单纯减小各组成部分的体积来实现其小型化已经变得越来越困难。因此,近年来人们致力于以新的设计理念来实现微缩成像系统。当前,基于生物复眼设计理念的人造复眼成像系统已经在实验阶段获得成功。

早在20世纪90年代中叶,各国的研究者就开始探索设计人造复眼成像系统并通过理论和实验验证其设计方案^[1-3]。其中,日本的研究人员就提出选用柱状的阶梯指数透镜阵列作为主要的光采集组件,将透镜阵列与光电二极管阵列结合起来,构成人造复眼系统,这一设计思路在实验中得到了验证^[1]。虽然因制作技术等原因在成像效果和结构尺寸上与理想的人造复眼成像系统有所差距,但为后来的研究工作提供了重要借鉴。进入21世纪以后,随着微加工技术的不断进步,人造复眼成像系统的研究也取得了突出进展。

2000年, Tanida J 领导的日本研究小组提出

了名为 TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics) 的复眼成像系统^[4-6],该系统的设计理念参考了蜻蜓同位复眼的思路。整个系统为平面结构,分别采用微透镜和光探测器作为光采集和接收组件,引入光隔离层以实现各光通道分离,并利用计算机对获得的信息进行数字处理以实现目标像的重建。该系统采用普通的折射型微透镜阵列,大大减小了厚度,成为真正意义上的微缩成像系统。由于 TOMBO 系统的各组件完全分立制作,因此在结构的改进上具有很好的灵活性。

2004年, Duparre J. 带领的德国研究小组同样基于同位复眼的设计理念提出并制成了人造同位复眼成像系统(Artificial Apposition Compound Eye Objective, APCO)^[7-11]。APCO 与 TOMBO 在结构上较为相似,均采用平面结构并将微透镜阵列与金属孔洞阵列(用于光通道分离)和光传感器阵列结合起来,以实现成像功能。不同之处在于微透镜阵列和孔洞阵列分别制作在同一玻璃基片两侧,并与光传感阵列紧密相连。APCO 系统结构紧凑,明显减小了系统厚度,但对制作精度有较高要求。此后,同一小组又提出用啁啾微透镜阵列代替普通的均匀微透镜阵列^[12-14]。这样做的好处在于可根据光线入射角度对各透镜的光轴方向,孔径大小以及形状进行适当调整,从而纠正因散光和场弯曲引起的成像失真,获得更为理想的成像效果。此外,采用啁啾微透镜阵列还可以在保证系统性能的前提下减少所需透镜数目,从而进一步缩小了系统

收稿日期 2008-01-18; 收到修改稿日期 2008-02-25

作者简介 邸思(1981—),男,博士研究生,主要从事微缩成像系统方面的研究。E-mail: si_di@siat.ac.cn

尺寸。

国内对人造复眼成像系统的研究始于20世纪90年代末期,在复眼成像系统光路仿真和实验方面已经做出了很多有价值的工作^[15-20]。特别是最近清华大学结合昆虫复眼运动神经具有的空间侧抑制机制,设计了一种全硬件方法实现的复眼模型^[21]。该模型的数字部分采用触发响应模式,使系统具有很宽的速度测量范围,实现了捕捉快速移动物体的功能,具有很高的应用价值。但由于制作技术的相对滞后,目前还没有制作出真正高度集成的微型人造复眼系统,这也将是国内研究者们今后的努力方向。

2 人造复眼成像系统研究新进展

2.1 新型人造复眼成像系统结构

对于人造复眼成像系统的研究首先体现在不同设计结构和设计理念的探索上。近年来,这方面的研究进展不断涌现,基于各种设计理念的人造复眼结构都在试验阶段获得了成功。

2.1.1 簇眼(Cluster Eye, CLEY)

2004年,德国的研究小组提出了基于重叠复眼设计理念的“簇眼”结构^[22-23]。该成像系统依然采用平面结构,主体部分由聚焦阵列,场阵列和中继阵列等三个具有不同功能的微透镜阵列构成,并与光传感阵列(如CCD或CMOS阵列)相连。三个透镜阵列的排列间隔不同,使得各光通道的光轴指向不同方向,从而获得比APCO系统更大的视场。目标物体的光信号首先通过聚焦透镜阵列在其焦平面上形成倒立的中间像。场透镜阵列位于聚焦透镜阵列的焦平面上,负责将中间像的光信号传送到中继透镜阵列。每个光通道的中间像通过与之对应的中继透镜放大,并最终被位于像平面上的传感器阵列接收。通过将接收到的各个中间像连接在一起,就获得了整个目标物体的正立像。

2.1.2 球面人造复眼(Spherical Artificial Compound Eye, SACE)

2007年,Duparre J等人又把同位复眼设计理念应用于曲面结构,提出了球面人造复眼成像系统^[24-25]。SACE由微透镜阵列,孔洞阵列,光中继器件和光传感器阵列构成。SACE成像系统的主体部分由一凸一凹两个体透镜构成。设计者采用曲面激光写入技术将担负光收集作用的微透镜阵列制作在凹透镜的曲面上,而与之对应的金属孔洞阵列则被制作在凸透镜表面。微透镜与金属孔洞

一一对应,构成不同方向的多个光通道。由于采用了曲面结构,SACE可以获得比APCO更大的成像视角。两个体透镜具有共同的曲率中心,且曲率半径之差恰好等于微透镜的焦距以保证光线穿过微透镜后在孔洞阵列所在曲面聚焦。各通道光信号被孔洞阵列接收后经光中继器放大,而后传送给光传感器阵列,经过光/电转换后,最终在计算机上成像。

2.1.3 自准直人造复眼

对于前面提到的各种人造复眼成像系统,由于各部分组件是单独制作后组装在一起(如TOM-BO, CLEY和SACE)或是分阶段在同一载体上制作而成(如APCO),在制作时各组件之间并无联系,因此相互之间的校准总会出现或多或少的偏差。这种校准误差会直接导致成像系统性能的下降。为了从根本上解决这一问题,J. Kim等人提出了基于微透镜和自写入聚合物波导^[26]的人造“小眼”^[27]。该人造“小眼”由人造橡胶微透镜,光敏聚合物和光探测器组成。在制作过程中,首先将光敏聚合物的一端粘上带有微透镜的人造橡胶薄膜,另一端直接与光探测器相连。而后用紫外光照射微透镜,从而在光敏聚合物上形成具有高折射率的锥体结构。随着紫外光强度的增加,当其超过某一门限时,就会在透镜焦点附近开始波导结构的自写入,直至到达衬底(光探测器)时完成。由于整个制作过程由透镜发起,并在其焦点的延长线上进行写入,因而在完成波导结构(即光通道)写入的同时,也实现了透镜—通道—光探测器的自校准,从而从根本上解决了校准误差问题。此后,该研究小组又在此基础上,将多个这种人造“小眼”排列在一半球形聚合物的曲面上,获得了自校准的曲面复眼成像系统^[28]。

2.2 人造复眼成像系统的新功能

对于人造复眼系统,最基本的平面黑白成像功能远远不能满足人们的需求。因此,人们一直努力实现人造复眼成像功能的拓展。最近的研究结果表明,通过对其结构设计和数字处理方法的改进可实现诸如多谱成像^[29-30],彩色成像^[31],指纹提取^[32],三维信息提取^[33-34],目标定位^[35],全视角成像^[36]等拓展功能。

2.2.1 彩色成像

2004年,日本的研究小组基于已有的TOM-BO系统,通过在微透镜阵列之后加入不同波长的滤波器,提出了两种实现彩色成像的方案:单元分

色和像素分色。单元分色是指对于 TOMBO 中的每个单元采用一种颜色的滤波器而相邻单元采用不同颜色的滤波器;像素分色是指在每个单元中相邻像素采用不同颜色的滤波器而所有单元的滤波器排列方式相同。也就是说,这两种方案是通过不同颜色滤波器的特定排列方式实现的。同时,二者也与物距直接相关:要想得到均匀的彩色信息,采用单元分色法时的物距是像素分色法所需物距的两倍。采用像素重置法,对成像器件收集到的彩色信号进行处理,最终将得到彩色的目标像。上述两种方案各有其优点:采用单元分色法,易于制作与成像器件相连的彩色滤波器,并能放宽成像条件;采用像素分色则可直接选择已商品化的彩色 CCD 作为成像器件。

2.2.2 指纹识别

2004 年,Tanida J. 等人提出了基于 TOMBO 的指纹识别系统。该系统在结构上与传统的 TOMBO 系统并无多大差别,只是引入了专用的发光组件并增加了用于手指定位的光导盘。进行指纹提取时,手指置于光导盘表面,同时用光源对待测手指进行照射以增强亮度。传统的 TOMBO 系统在设计时对无穷远处的目标点聚焦,而用于指纹提取的 TOMBO 则要实现对近距离的指纹信号聚焦。此外,对于传统的 TOMBO,所有通道几乎同时观察目标的同一部分;而指纹提取系统的各通道则对手指的不同部分进行观察,所得的复合像是被每个单元捕捉到的一系列部分指纹像。利用改进的像重建算法,对这些指纹片段进行阴影补偿,单元像分离,边缘位置像素的移除,单元像旋转及连接等一系列处理,可获得较为理想的指纹提取结果。

2.2.3 全视角成像

最近,Duparre J. 等人实现了基于人造同位复眼的全视角成像系统^[36]。该系统引入了可旋转的机械轴,在机械轴表面纵向排列一维微透镜阵列并将其与线型数字成像传感器相连。通过机械轴的转动来实现微透镜对各视角光信息的采集,将从不同角度收集到的像片段连接起来就实现了全视角的成像。此全视角复眼成像系统结构简单,在系统体积上可达到平面人造同位复眼的水平,尤其适于应用在医疗内窥镜或是微小孔洞探测等方面。

3 结束语

从人造复眼成像系统的出现至今不过十余年的时间,但在设计理念,制作技术,系统性能乃至功

能拓展等各个方面都取得了长足的进步。基于目前人造复眼的研究现状,今后在系统成像性能的提高和应用领域的进一步拓展上还有许多工作要做。例如在复眼结构上,可以采用可调焦微透镜来改善系统对于不同物平面目标同时成像的能力。在今后的应用上,还可将人造复眼推广在小型个人物品(如信用卡)上或是将其应用于医疗检测设备上。总之,随着系统性能进一步的提高和功能的进一步拓展,人造复眼将会在成像领域占有越来越重要的地位。

参考文献

- [1] Ogata S, Ishida J, Sasano T. Optical sensor array in an artificial compound eye [J]. *Opt. Eng.*, 1994, 34 (11): 3649-3655.
- [2] Sanders J S, Halford C E. Design and analysis of apposition compound eye optical sensors [J]. *Opt. Eng.*, 1995, 34(1): 222-235.
- [3] Hamanaka K, Koshi H. An artificial compound eye using a microlens array and its application to scale invariant processing [J]. *Opt. Review.*, 1996, (3): 264-268.
- [4] Tanida J, Kumagai T, Yamada K, *et al.* Observation module by bound optics (TOMBO): an optoelectronic image capturing system [C]. *SPIE*, 2000, 4089: 1030-1036.
- [5] Tanida J, Kitamura Y, Yamada K, *et al.* Compact image capturing system based on compound imaging and digital reconstruction [C]. *SPIE*, 2001, 4455: 34-41.
- [6] Tanida J, Kumagai T, Yamada K, *et al.* Thin observation module by bound optics (TOMBO): concept and experimental verification [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(10): 1806-1813.
- [7] Duparre J, Schreiber P, Dannberg P, *et al.* Artificial compound eyes - different concepts and their application to ultra flat image acquisition sensors [C]. *SPIE*, 2004, 5346: 89-100.
- [8] Duparre J, Dannberg P, Schreiber P, *et al.* Artificial apposition compound eye fabricated by micro-optics technology [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43 (22): 4303-4310.
- [9] Duparre J, Dannberg P, Schreiber P, *et al.* Micro-optically fabricated artificial apposition compound eye [C]. *SPIE*, 2004, 5301: 25-33.
- [10] Duparre J, Wippermann F, Dannberg P, *et al.* Micro-optical artificial compound eyes - from design to experimental verification of two different concepts [C]. *SPIE*, 2005, 5962: 1-12.
- [11] Duparre J, Dannberg P, Schreiber P, *et al.* Thin compound-eye camera [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44 (15): 2949-2956.
- [12] Duparre J, Wippermann F, Dannberg P, *et al.* Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence [J]. *Opt. Express*,

- 2005, 13(26): 10539-10551.
- [13] Wippermann F, Duparre J, Schreiber P, *et al.* Design and fabrication of a chirped array of refractive ellipsoidal micro-lenses for an apposition eye camera objective [C]. SPIE, 2005, 5962: 1-11.
- [14] Wippermann F, Duparre J, Schreiber P, *et al.* Applications of chirped microlens arrays for aberration compensation and improved system integration [C]. SPIE, 2006, 6289: 1-12.
- [15] 高爱华, 朱传贵. 仿复眼成像的实验模拟研究 [J]. 西北大学学报, 1998, 28(2): 117-120.
- [16] 李文元, 高琦, 王红会, 等. 昆虫复眼视觉系统的计算机模拟 [J]. 天津大学学报, 2000, 33(2): 259-261.
- [17] 田维坚, 姚胜利, 陈荣利, 等. 用于运动目标探测的多通道成像系统 [J]. 光子学报, 2002, 31(1): 47-49.
- [18] 向思桦, 陈四海, 潘峰, 等. 柔性仿生复眼成像系统探测机理模拟研究 [J]. 半导体光电, 2005, 26: 26-29.
- [19] 黄祝新, 徐贵力. 仿生复眼测量系统中全景图生成的研究 [J]. 计测技术, 2006, 26: 17-20.
- [20] 张宏鑫, 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.
- [21] 陶圣, 曾理江. 结合空间侧抑制的仿生复眼模型 [J]. 光学技术, 2007, 32(3): 337-344.
- [22] Duparre J, Schreiber P, Volk R. Theoretical analysis of an artificial superposition compound eye for application in ultra flat digital image acquisition devices [C]. SPIE, 2004, 5249: 408-418.
- [23] Duparre J, Schreiber P, Matthes A, *et al.* Microoptical telescope compound eye [J]. Opt. Express, 2005, 13(3): 889-903.
- [24] Duparre J, Radtke D, Tunnermann A. Spherical artificial compound eye captures real images [C]. SPIE, 2007, 6466: 1-9.
- [25] 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.
- [26] Shoji S, Kawata S, Sukhorukov A A, *et al.* Self-written waveguides in photopolymerizable resins [J]. Opt. Lett., 2002, 27(3): 185-187.
- [27] Kim J, Jeong K H, Lee L P. Artificial ommatidia by self-aligned microlenses and waveguides [J]. Opt. Lett., 2005, 30(1): 5-7.
- [28] Jeong K H, Kim J, Lee L P. Biologically inspired artificial compound eyes [J]. Science, 2006, 312: 557-561.
- [29] Shogenji R, Kitamura Y, Yamada K, *et al.* Multi-spectral imaging system by compact compound optics [C]. SPIE, 2003, 5225: 93-100.
- [30] Shogenji R, Kitamura Y, Yamada K, *et al.* Multi-spectral imaging using compact compound optics [J]. Opt. Express, 2004, 12(8): 1643-1655.
- [31] Tanida J, Shogenji R, Kitamura Y K, *et al.* Color imaging with an integrated compound imaging system [J]. Opt. Express, 2004, 11(18): 2109-2117.
- [32] Shogenji R, Kitamura Y, Yamada K, *et al.* Bimodal fingerprint capturing system based on compound-eye imaging module [J]. Appl. Opt., 2004, 43(6): 1355-1359.
- [33] Yamada K, Mitsui H, Asano T, *et al.* Development of Ultra thin three dimensional image capturing system [C]. SPIE, 2006, 6056: 1-9.
- [34] Horisaki R, Irie S, Ogura Y, *et al.* Three-dimensional information acquisition using a compound imaging system [J]. Opt. Review, 2007, 14(5): 347-350.
- [35] Bruckner A, Duparre J, Brauer A, *et al.* Position detection with hyperacuity using artificial compound eyes [C]. SPIE, 2007, 6501: 1-10.
- [36] 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 [C]. SPIE, 2007, 6503: 1-12

New Progress of Artificial Compound Eye Imaging Systems

DI Si XU Hong-kui DU Ru-xu

(Center for Precision Engineering, Shenzhen Institute of Advanced Technology Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518067, China)

Abstract Artificial compound eyes imaging system has the advantages of miniature size, low power consumption and wide view field. It is a kind of imaging systems with wide range of applied perspectives. The study background and new progress of artificial compound eye imaging systems are introduced. It includes that various artificial compound eyes structure based on different bionic design concepts and experimental systems which can achieve various imaging functions such as color imaging, fingerprint identification, full view field imaging. At last, the research direction of this issue is discussed.

Key words artificial compound eyes; miniature imaging system; microlens array; photo-detect array