

文章编号 1004-924X(2006)03-0346-05

曲面复眼成像系统的研究

张红鑫^{1,2}, 卢振武¹, 王瑞庭³, 李凤有¹, 刘 华^{1,2}, 孙 强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, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 吉林大学 数学学院, 吉林 长春 130022)

摘要:研究了两种曲面复眼成像系统,并首次将曲面场镜阵列引入曲面复眼成像系统,使其边缘视场的成像质量进一步提高,视场角进一步加大。进行了成像系统的建模以及光线追迹,两种结构的视场角分别达到 60° 和 88° ,整个系统的体积分别为 $0.9\text{ mm}\times 0.9\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 和 $0.9\text{ mm}\times 0.9\text{ mm}\times 0.75\text{ mm}$ 。文中给出了用激光直写设备在曲面基底上进行光刻来制作曲面微透镜阵列的方法。

关键词:复眼成像系统;视场角;曲面微透镜阵列;光刻

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

Study on curved compound eye imaging system

ZHANG Hong-xin^{1,2}, LU Zhen-wu¹, WANG Rui-ting³, LI Feng-you¹, LIU Hua^{1,2}, SUN Qiang¹

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

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *College of Mathematics, Jilin University, Changchun 130012, China)*

Abstract: Two kinds of curved compound eye image systems were studied. It is the first time that a curved field lens array was introduced into the curved compound eye image system to improve the image quality of the marginal Field of View(FOV) and enlarge the FOV. The model of a image system was designed and the ray trace was completed based the software LIGHTTOOLS. The FOVs of the two systems are 60° and 88° ; the volume are $0.9\text{ mm}\times 0.9\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ and $0.9\text{ mm}\times 0.9\text{ mm}\times 0.75\text{ mm}$, respectively. The lithography technique to fabricate the curved microlens array on the curved substrate by using laser direct writing system was also given.

Key words: compound eye imaging system; Field of View(FOV); curved microlens array; lithography

1 引言

随着光学成像系统应用领域的扩展,人们对

其要求也不断提高,如智能武器的光学传感器、机器人视觉和微型飞行器等期望光学系统的质量更轻、体积更小、视场角更大以及对运动物体更敏感等,显然,目前我们广泛使用的单孔径光学系统已

经无法同时满足上述要求。

生物界中昆虫复眼的光学结构可以通过多个小眼把视场分隔为若干部分分别成像,然后经过对各个像的接合,形成最后完整的像。这样的系统分辨率比较低,但是它有质量轻、体积小、视场大以及对运动物体敏感等优点。受到昆虫复眼的启发^[1-3],有人陆续提出过一些仿生复眼的光学系统^[4-7],但受制作工艺的限制,有关人工复眼的研究仍然停留在平面系统的水平上,这无疑丧失了复眼的许多优点,例如复眼的大视场特性显然受到了很大的限制。

本文研究了两种曲面复眼成像系统:单层曲面复眼成像系统和三层曲面复眼成像系统。在三层曲面复眼成像系统中,首次引入了曲面场镜阵列,使系统的边缘视场成像质量进一步提高,视场角进一步加大。文中给出了这两种曲面复眼成像系统的实例,并用 LIGHTTOOLS 软件进行建模和光线追迹。两种结构的视场角分别达到 60° 和 88° ,整个系统的体积分别为 $0.9\text{ mm}\times 0.9\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 和 $0.9\text{ mm}\times 0.9\text{ mm}\times 0.75\text{ mm}$ 。最后还对曲面微透镜阵列的制作工艺进行了初步讨论,提出了用激光直写设备在曲面基底上进行光刻来制作曲面微透镜阵列的方法。

2 曲面复眼成像系统的结构及其工作原理

曲面复眼成像系统的工作原理是将物空间分为若干个小视场,每个成像通道对应一个小视场,将这个小视场的像成在像面上,在像面上得到由多个小像组合而成的完整物空间的像。该系统的工作原理与生物界中昆虫复眼的工作原理十分相似,昆虫复眼的每一个小眼相当于这里的每一个成像通道,各个通道也像昆虫小眼那样沿球面分布。

最简单直观的曲面复眼成像系统由一层曲面分布的微透镜阵列组成,每一个微透镜相当于一个小眼,构成了一个成像通道。

图 1 为单层曲面复眼成像系统示意图。这种结构与昆虫复眼的形态很相似,工作原理也完全一样。由于目前的探测器绝大多数是平面结构,所以对单层曲面复眼成像系统来说,边缘视场的

成像质量会大大下降。为了提高边缘视场的成像质量,使整个系统的视场进一步扩大,我们引入一个曲面场镜阵列得到三层曲面复眼成像系统。

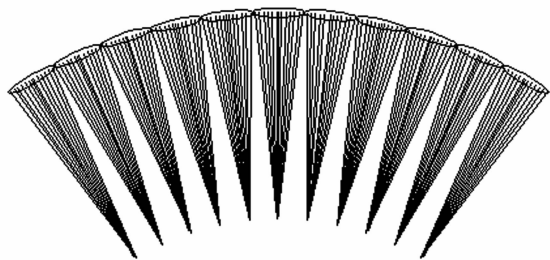


图 1 单层曲面复眼成像系统

Fig. 1 Single-layer curved compound eye image system

图 2 为三层曲面复眼成像系统示意图。它由周期不同的三层曲面分布的微透镜阵列组成,上下相对应的小透镜组成了一个成像通道,分别对相应的视场范围进行成像。中间一层微透镜阵列的作用与场镜相似,可以将这里的离轴光线改变方向传播到下面的微透镜阵列上。

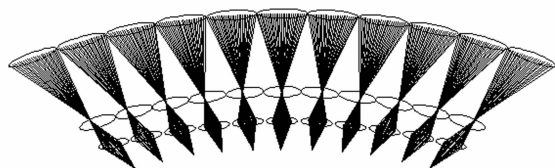


图 2 三层曲面复眼成像系统

Fig. 2 Three-layer curved compound eye image system

3 曲面复眼成像系统的设计与分析

在曲面复眼成像系统中,各个成像通道的成像质量由相对应的微透镜决定,由于微透镜的尺寸很小,所以每个成像通道的数值孔径很小,分辨率不高。另外,在实际制作中,微透镜阵列是位于玻璃基底之上的,相对于尺寸很小的透镜来说,玻璃基底的厚度对系统的影响不可忽视。为了进一步了解曲面复眼成像系统的成像情况和曲面场镜阵列对整个系统的影响,采用了 LIGHTTOOLS 软件对以上两种不同的结构分别设计实例模型,并且进行光线追迹。

图 3 是单层曲面复眼成像系统模型,材料为 Schott—BK7 玻璃。选取了中间一列的 6 个透镜构成的 6 个成像通道对其所对应的主视场进行光

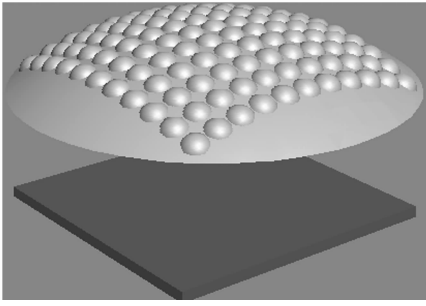


图 3 单层曲面复眼成像系统模型

Fig. 3 Model of single-layer curved compound eye image system

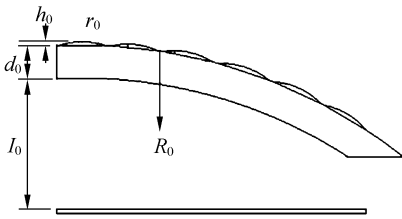


图 4 单层曲面复眼成像系统的结构参数

Fig. 4 Parameters of single-layer curved compound eye image system

线追迹,各个参数如图 4 中所示:

图 4 中,各个参数的取值如下: $r_0 = 0.2 \text{ mm}$ 、 $R_0 = 1.435 \text{ mm}$ 、 $h_0 = 0.011 \text{ mm}$ 、 $d_0 = 0.079 \text{ mm}$ 、 $l_0 = 0.359 \text{ mm}$ 。其中, r_0 为小透镜的曲率半径; R_0 为基底外侧曲率半径; h_0 为小透镜的矢高; d_0 为基底厚度; l_0 为对 0 度视场成像的小眼下面的基底内侧与探测器之间的距离;两小眼之间的夹角 $\alpha_0 = 6^\circ$ 。

此系统的视场角达到 60° ,光线追迹的结果如图 5 所示。可见,单层曲面复眼成像系统虽然结构简单,但是受到平面探测器的限制,系统边缘

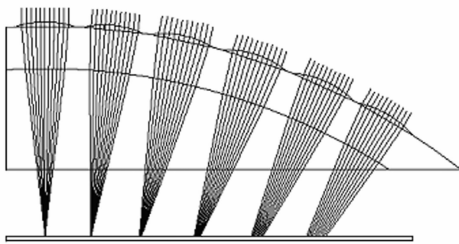


图 5 单层曲面复眼成像系统光线追迹

Fig. 5 Ray trace of single-layer curved compound eye image system

视场的成像质量大大下降,这样也阻碍了整个系统视场的进一步扩大。为了解决这个问题,我们引入一个曲面场镜阵列,得到三层曲面复眼成像系统。

图 6 是三层曲面复眼成像系统模型,材料为 Schott-BK7 玻璃。我们选取每层中间一列的 6 个透镜构成的 6 个成像通道对其所对应的主视场进行光线追迹,各个参数如图 7 中所示:

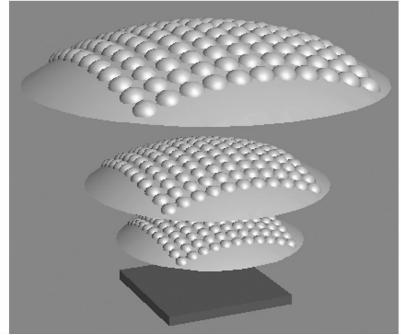


图 6 三层曲面复眼成像系统模型

Fig. 6 Model of three-layer curved compound eye image system

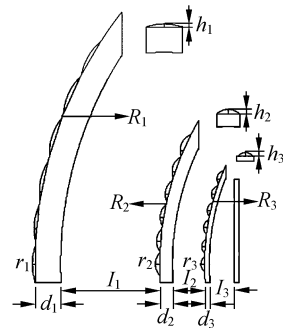


图 7 三层曲面复眼成像系统的结构参数

Fig. 7 Parameters of three-layer curved compound eye image system

图 7 中,各个参数的取值如下: $r_1 = 0.2 \text{ mm}$ 、 $r_2 = 0.06 \text{ mm}$ 、 $r_3 = 0.03 \text{ mm}$ 、 $R_1 = 1.435 \text{ mm}$ 、 $R_2 = 0.995 \text{ mm}$ 、 $R_3 = 0.837 \text{ mm}$ 、 $h_1 = 0.011 \text{ mm}$ 、 $h_2 = 0.015 \text{ mm}$ 、 $h_3 = 0.013 \text{ mm}$ 、 $d_1 = 0.079 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 0.045 \text{ mm}$ 、 $d_3 = 0.017 \text{ mm}$ 、 $l_1 = 0.359 \text{ mm}$ 、 $l_2 = 0.113 \text{ mm}$ 、 $l_3 = 0.087 \text{ mm}$ 。其中, r_1 、 r_2 、 r_3 为三层微透镜阵列每一层的小透镜曲率半径; R_1 、 R_2 、 R_3 为三层基底每一层的外侧曲率半径; h_1 、 h_2 、 h_3 为三层微透镜阵列中每一层小透镜的矢高; d_1 、 d_2 、 d_3 为三层基底每一层的厚度; l_1 、 l_2 、

l_3 为三层微透镜阵列与探测器之间的距离;每层微透镜阵列中相邻小透镜的夹角为 $a_1 = 8.8^\circ$ 、 $a_2 = 5^\circ$ 、 $a_3 = 4.3^\circ$ 。

此系统的视场达到 88° , 光线追迹的结果如图 8 所示。可见,虽然三层曲面复眼成像系统的结构比较复杂,但是其边缘视场的成像质量得到了提高,从而有利于整个系统视场角的进一步扩大。

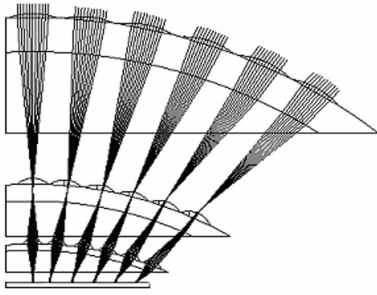


图 8 三层曲面复眼成像系统光线追迹

Fig. 8 Ray trace of three-layer curved compound eye image system

以对 0° 视场成像的小眼为例,在模拟的过程中发现微透镜阵列的基底厚度增大时,其焦距变大,从而导致整个系统的体积变大;但是曲面微透镜阵列的制作工艺要求基底厚度不易过小,所以,在设计过程中,要权衡这两方面的因素,选择适当的基底厚度。

4 曲面微透镜阵列制作工艺的研究

目前,微透镜阵列的制作工艺还仅仅停留在平面的水平,用于制作平面微透镜阵列的方法有离子交换法、光敏玻璃热成形法、光刻胶热熔法、光电反应刻蚀法、聚焦离子束刻蚀与沉积法等。显然,在所设计的曲面复眼成像系统中,曲面微透镜阵列是重要的组成部分。在研制出曲面微透镜阵列的基础上,还需要再制作出不同周期、不同曲率、不同 F 数的微透镜阵列来满足需要。

长春光机所自主研发的四轴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

了显著成果^[8-11]。该设备的一个显著特点是具有可以上下移动的 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,可以首先在曲面基底上制做曲面光栅;再以曲面光栅作为掩模板,在涂有光刻胶的曲面基底上进行两次正交的曝光;经过显影后,将得到的图形热熔,得到由光刻胶组成的曲面微透镜阵列;最后用离子束刻蚀设备进行图形转移,得到最终需要的曲面微透镜阵列。目前,曲面光栅的制作已经完成,其他的工艺实验正在进行中。

图 9 为利用激光直写设备制作的曲面光栅在显微镜下的检测结果。

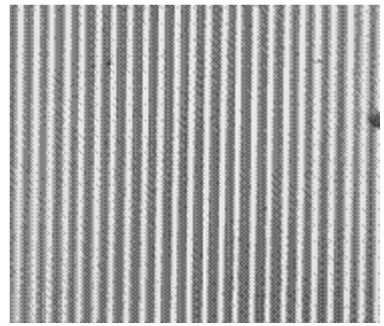


图 9 曲面光栅

Fig. 9 Curved grating

5 结 论

随着光学成像系统应用领域的扩展,光学系统的重量更轻、体积更小、视场角更大以及对运动物体更敏感等要求成为目前的研究热点和难点。本文研究了两种曲面复眼成像系统,并首次将曲面场阵引入曲面复眼成像系统,使其边缘视场的成像质量进一步提高,视场角进一步加大。文中用 LIGHTTOOLS 软件进行了建模以及光线追迹,两种结构的视场角分别达到 60° 和 88° , 整个系统的体积分别为 $0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 和 $0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm} \times 0.75 \text{ mm}$ 。文中讨论了用激光直写设备在曲面基底上进行光刻来制作曲面微透镜阵列的方法,为实际制作出曲面复眼成像系统奠定了良好的基础。

参考文献:

[1] BARLOW H B. The size of ommatidia in apposition eyes [J]. *Experimental Biology*, 1952, 29(4): 667-674.

- [2] HORRIDGE G A. The compound eye of insects [J]. *Scientific American*, 1977, 237:108-120.
- [3] LAND M F. Compound eyes: old and new optical mechanisms [J]. *Nature*, 1980, 287:681-686.
- [4] STANGE G, SRINIVASAN M, DALCZYNSKI J. Rangefinder based on intensity gradient measurement [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(13): 1695-1700.
- [5] DUPARRE J. Microoptical telescope compound eye [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 889-903.
- [6] JEFFREY S S, HALFORD C E. Design and analysis of apposition compound eye optical sensors [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(1):222-235.
- [7] OGATA S, ISHIDA J, SASANO T. Optical sensor array in an artificial compound eye[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3649-3655.
- [8] 李凤有, 李红军, 卢振武, 等. 激光直写系统焦斑整形的研究[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(1):14-18.
LI F Y, LI H J, LU ZH W, *et al.* Focused spot shaping in laser writing system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1):14-18. (in Chinese)
- [9] LI F Y, LU ZH W, XIE Y J, *et al.* Binary laser direct writing system and its applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(5):451-454.
- [10] XIE Y J, LU ZH W, LI F Y, *et al.* Lithographic fabrication of large diffractive optical elements on a concave lens surface [J]. *Optics Express*, 2002, 10(20): 1043-1047.
- [11] 卢振武, 刘华, 李凤有. 利用曲面计算全息图进行非球面检测[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(6):555-559.
LU ZH W, LIU H, LI F Y. Aspheric surface testing with CGH on curved surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(6):555-559. (in Chinese)

作者简介:张红鑫(1978—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学专业博士研究生,从事光学设计、光刻技术、二元光学等研究。