

文章编号 1004-924X(2017)增-0072-09

多孔径大视角仿生复眼成像系统

郝永平¹, 李 伦^{1*}, 刘凤丽¹, 刁晓蕾¹, 焦中元²

- (1. 沈阳理工大学 兵器科学与技术研究中心, 辽宁 沈阳 110159;
2. 雷沃重工股份有限公司, 山东 潍坊 261206)

摘要:为了实现体积小、视场大、对运动物体敏感的成像装置,基于昆虫复眼建立了一种利用光纤面板作为折转光学元件的多孔径大视角成像实验系统,对该系统采用的成像单元、子眼分布角度及折转元件性能进行了分析,有效提高了离轴光线利用率,改善了复眼成像系统边缘成像质量差。根据系统整体视场角度要求,采用 9 眼成像通道并计算各成像通道的分布位置及角度,然后对单个子眼通道进行优化设计,保证系统视场角度及成像质量,最后分析成像透镜、折转元件和光探测阵列的匹配问题,选择最佳的折转方案。实验表明,利用光纤面板作为折转元件的多通道成像实验系统实现大视角成像功能,视场角度可达 120°,相比传统的单孔径成像系统可以实现小体积下的大视角成像功能。

关键词:复眼成像;光学设计;光纤面板;大视场

中图分类号:O439;TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0072

Multi-aperture and large field imaging experimental system based on artificial compound eyes

HAO Yong-ping¹, LI Lun^{1*}, LIU Feng-li¹, DIAO Xiao-lei¹, JIAO Zhong-yuan²

- (1. *Research Center of Armament Science and Technology, Shenyang Ligong University, Shenyang 110519, China;*
 2. *Lovol Heavy Industry Co. Ltd., Weifang 261206, China)*
- * *Corresponding author, E-mail:11408907652@163.com*

Abstract: In order to realize artificial compound eyes with small volume, large field of view and sensitive to moving objects, a multi-aperture and large angle imaging experiment system was established, which used a fiber optic panel as deflector optical elements. The imaging unit of this system, the distribution angle of the ommatidia and the performance of the deflector element were analyzed and studied, effectively improving the utilization rate of off-axis light and image quality of the compound eye imaging system. First, according to the whole field angle requirement of the system, nine ommatidia channels were used to calculate the distribution and angle of each imaging channel. Then, the design of single ommatidia channel was optimized to ensure the system field angle and imaging quality. Finally, matching problems in imaging lens, deflector elements and light detection array were analyzed, thus selecting the best deflector program. Experiments show that the multi-channel imaging experi-

收稿日期:2017-06-30;修订日期:2017-07-12.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA042701);总装基金资助项目(No. 9140A05020115QT28057)

ment system with fiber optic panel as the folding element can realize the large-angle imaging function, and the viewing angle can reach 120° . Compared with the traditional single-aperture imaging system, the system can realize the large angle imaging function under a small volume.

Key words: compound eye imaging; optical design; fibre-optic faceplate; large field of view

1 引 言

日趋复杂多变的战场环境,对成像探测装置的要求也不断提高。小体积、大视角、对运动物体灵敏等特点的成像装置成为未来侦察领域发展方向^[1-3]。传统的单孔径成像装置中,广角相机的视场角度可以达到 180° ,但其镜头通常需要 10 片以上的透镜组合而成,体积和重量都较大,且会产生较大畸变,图像变形严重,无法满足未来战场微小探测器的需求^[4-6]。

昆虫复眼是由几个到几万个小眼沿曲面阵列的方式分布在头部的两侧。不同于传统单孔径成像系统,昆虫复眼属于多通道成像系统,其各个子眼对目标物分别进行成像。彼此之间互不干扰,视觉神经中枢将各通道小眼采集的图像进行拼接^[7-8],实现大视角成像以及对目标的三维定位。受到昆虫复眼的启发,研究人员提出基于平面微透镜阵列的复眼成像系统,该系统各小眼均能够对目标物进行成像。由于每个小眼的视场角度有限,导致整体视场角度较小,丧失了复眼大视角成像的特点,限制了其应用范围。为扩大仿生复眼的成像角度,研究人员提出了曲面复眼成像系统。曲面成像系统需要将多个小眼阵列集成在曲面基底上,单个小眼的尺寸较小,目前的加工技术水平还不能达到要求。并且,当下 CCD/CMOS 都为平面型,偏离主光轴角度越大,成像质量越低,从而导致曲面透镜阵列边缘部分的成像质量较差^[9-10]。

本文提出了一种基于复眼原理的多通道大视场成像实验系统。通过模拟昆虫单个子眼分别独立成像,将 9 个成像透镜按照一定角度分布,分别对各方向进行成像,可以有效扩大视场角度,减小成像系统体积。利用光纤面板作为折转元件,将各方向成像透镜汇聚光线均匀地投射到光探测阵列的光敏区域上,通过 PC 输出图像。各成像通道在各自的方向上独立成像,后期通过图像拼接及融合手段得到完整的大视角图像。此外,单个透镜及光纤面板的加工工艺成熟、成本较低。

2 多通道成像系统结构及成像原理

如图 1 所示,成像系统整体结构包括成像透镜、球形支架、光纤面板和光探测阵列。每个成像透镜是以 3 片式库克镜头为初始结构重新设计而成。成像透镜、光纤面和光探测阵列构成一个成像单元,对其视场方向内的目标物进行成像。9 个成像透镜分成两级固定在球形支架上,与抛光后的光线面板各表面一一对应,保证各成像透镜采集的目标物信息经光纤面板均匀地传输到光探测阵列。

成像透镜的视角较大,相邻成像通道的视场之间存在重叠区域,可以消除系统整体的视场盲区。各成像通道采集的图像通过计算机输出,各视角图像经过图像预处理、图像拼接及图像融合等处理过程,得到完整的大视角图像。在该成像系统中,各成像通道的分布位置以及成像透镜的视场范围决定着系统整体的成像视场角度。

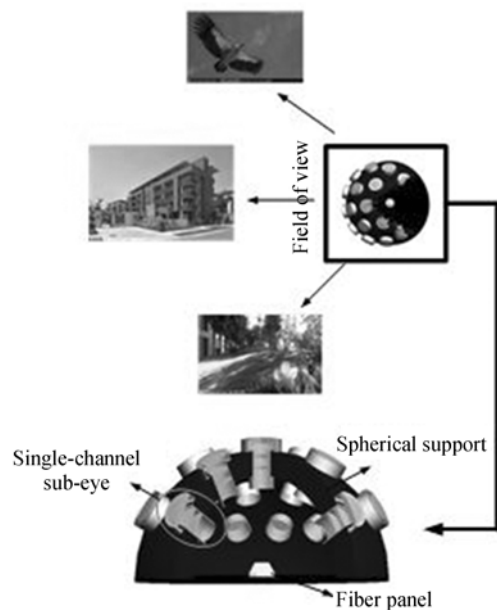


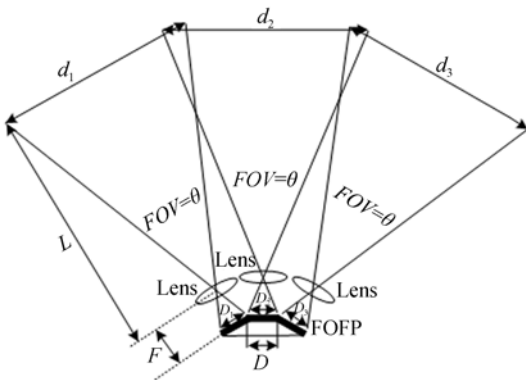
图 1 大视场复眼结构成像原理

Fig. 1 Imaging principle of compound eye structure with large FOV

3 系统参数设计

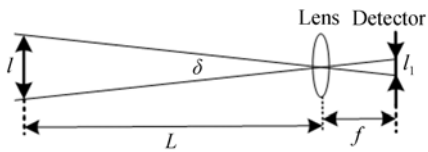
3.1 成像单元参数计算

多通道复眼成像系统具有 9 个成像单元,每个成像单元由成像透镜、光纤面板和光探测阵列组成。成像透镜的设计参数及光纤面板的抛光角度决定着整体系统的视场范围和成像距离,成像透镜在球形支架的位置参数与光探测阵列的分辨率决定着整体系统的成像质量。因此,为获取较大的成像范围和较好的成像质量,根据成像单元中各组件的装配关系,计算出各组件的尺寸及位置等。例如,根据成像透镜的参数确定光纤面板各表面尺寸及其丝径,进而选择合适的光探测阵列,如图 2 所示。



(a)物面与像面的关系

(a)Relationship between object plane and image plane



(b)分辨力与探测器的关系

(b)Relationship between resolution and detector

图 2 子眼镜头与像面关系示意图

Fig. 2 Relation between sub-eye lens and image plane

该系统具有 9 个成像通道,分为两级。第 1 级成像通道与光探测阵列垂直,第 2 级成像通道与第 1 级具有一定的偏转角度,成像透镜所成的像会产生较大的变形。采用光线面板作为折转元件,可以有效解决第 2 级成像通道图像变形等问题,同时可以扩大系统整体的视场角度。

如图 2 所示,假设成像透镜的视场角为 θ ,焦

距为 F ,物空间到成像透镜的距离为 L ,物空间的大小为 d_i ,成像平面尺寸为 D_i 。要对视场角 θ 范围内的物体进行成像,根据物像关系,成像平面尺寸为:

$$D_i = 2F \tan\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (1)$$

所以,要使光探测阵列能够接收到该方向上的全部图像信息,该成像通道对应光纤面板各表面的面积 D_i' 需要满足条件:

$$D_i' > 2F \tan\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (2)$$

在保证系统整体视场角度的同时,还要考虑成像透镜在最小分辨率时的成像质量,如图 2(b) 所示, δ 为最小分辨角,物空间到成像透镜的距离为 L ,成像透镜的焦距为 f ,最小可分辨的物体长度为 l 。根据物像关系,透镜在最小分辨率条件下所成的像的尺寸为:

$$l_1 = 2f \tan\left(\frac{\delta}{2}\right). \quad (3)$$

根据式(3),符合要求光纤面板的丝径为:

$$\varphi > 2f \tan\left(\frac{\delta}{2}\right). \quad (4)$$

光探测阵列的实际像素尺寸为:

$$s < 2f \tan\left(\frac{\delta}{2}\right). \quad (5)$$

此时才能达到最小分辨率角的要求。因此,准确计算光纤面板各抛光面的尺寸,选择光纤面板的丝径和分辨率适合的光探测阵列决定着系统整体的视场角度及成像质量。

根据计算公式(1)~(5)可知,设镜头焦距为 5 mm,视场角度为 52° ,最小分辨角为 5×10^{-4} rad,经计算可得, $D > 4.87$ mm, $s < 4.36 \mu\text{m}$ 。因此,可以根据以上计算方式选择合适的光纤面板及光探测阵列元件型号。

3.2 成像透镜参数设计及优化

利用光纤面板作为折转元件,其作用是将不同方向汇聚的光线均匀传输到同一片光探测阵列上,避免第 2 级成像通道采集的图像产生变形。光纤面板作为中间元件,其抛光后的各表面作为成像透镜的焦平面。各成像透镜所成像的尺寸不能超过与之对应的光纤面板平面。因此,只需要计算最小面所对应的成像透镜参数即可。取光纤面板顶面作为参照面,其尺寸如图 3 所示。

图 3 中,光纤面板顶面作为它所对应成像通

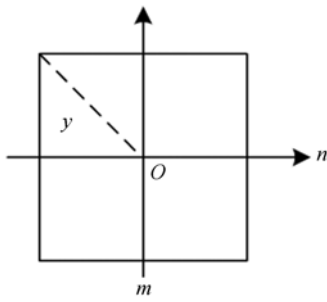


图 3 抛光后光纤面板顶面
Fig. 3 Top surface of polished fiber

道的焦平面,焦平面上所成像的半像高应稍大于光纤面板有效成像面的对角线半径,以避免透镜装调偏离光轴而形成暗角。半像高尺寸可根据成像透镜的视场角度和有效焦距来计算。 y 为半像高, f 为有效焦距, 2ω 为视场角度,根据成像关系,在焦平面上的半像高为:

$$y = -f \tan \omega \quad (6)$$

成像透镜的设计焦距为 12 mm,相对孔径 D/f 不小于 1/2. 8,光纤面板的顶面尺寸 $m=2$ mm, $n=2$ mm,根据式(6)简单计算可得出透镜的半像高和半视场角分别为:

$$y = 2 \sqrt{m^2 + n^2} / 2 \approx 2.838 \text{ mm},$$

$$\omega = \text{atan} \left[\frac{y}{f} \right] \approx 13.26^\circ.$$

根据最小焦平面尺寸计算得出,透镜视场角 $2\omega=26.5^\circ$ 。为避免系统出现视场盲区,同时能够满足其他各面上像高尺寸的要求,透镜的设计视场角度应大于 26.5° 。查阅光学技术手册选定初始结构为后置光阑的三片物镜结构,初始参数为:焦距 $f'=42.12$ mm;相对孔径 1/2. 8;视场角 $2\omega=54^\circ$,其他参数如表 1 所示。

表 1 子眼透镜初始参数

Tab. 1 Initial parameters of sub-eye lens

S/面	曲率 r/mm	距离 d/mm	折射率 n	阿贝数 v
S ₁	13.44	4.41	1.67779	55.2
S ₂	30.996	4.41		
S ₃	40.614	1.01	1.59341	35.5
S ₄	13.44	2.39		
S ₅	32.508	3.36	1.69669	55.4
S ₆	-27.006			

表 1 中,S₁-S₆ 分别代表物镜各表面, r 为对应表面的曲率半径, d 为前一表面到后一表面的直线距离, n 为透镜选用材料的折射率, v 为阿贝数。通过对初始镜头进行焦距放缩,将镜头的焦距缩放为 12 mm。为获得更好的成像质量,需要对放缩后的透镜进行优化。分析该透镜结构,可以作为优化变量的有:6 个曲率半径,2 个空气间隔和 3 个材料厚度。建立目标优化函数:有效焦距 EFL、球差 SPHA 和调制传递函数 MTF,设置优化目标值。通过优化不同的参数变量,得到最佳的透镜参数。优化后的透镜参数如表 2 所示。

表 2 优化后透镜参数

Tab. 2 Optimized lens parameters

S/面	曲率 r/mm	距离 D/mm	折射率 n	阿贝数 v
S ₁	4.086159	0.799595	1.753977	52.4305
S ₂	8.438969	0.853195		
S ₃	-7.741215	0.400226	1.620040	36.3665
S ₄	4.250385	0.417198		
STO	Infinity	0.200002		
S ₅	10.470792	0.459657	1.753977	52.4305
S ₆	-6.362374	10.511799		

在 ZEMAX 中使用合适的优化函数和权重对像差进行校正,逐步消除了基本像差、高级像差,并进行了像差平衡,获得成像透镜的实际焦距为 11.953 mm,MTF 曲线也较为理想。优化后的结果如图 4 所示。优化后的成像透镜不仅体积小、结构紧凑,而且像质较好。

图 4(a)所示为优化后的成像透镜结构,镜头采用凹凸透镜的结构,可以有效校正球差,同时通过对称结构的光学系统可以减小彗差对透镜的影响。如图 4(b)所示,该镜头在 4 个不同入射角度下的像斑尺寸分别为 1.489(对应入射角 0°),1.598(对应入射角为 7.5°),2.528(对应入射角为 17.68°), $1.870 \mu\text{m}$ (对应入射角度为 25°)。根据透镜的 MTF 曲线图 4(c)可以看出,MTF 曲线与频率坐标轴围成的区域面积显示,该透镜能量比较理想。由图 4(d)可以看出,成像结果的最大畸变量为 2.168 4%,小于人眼可分辨的畸变量 4%,满足使用要求。

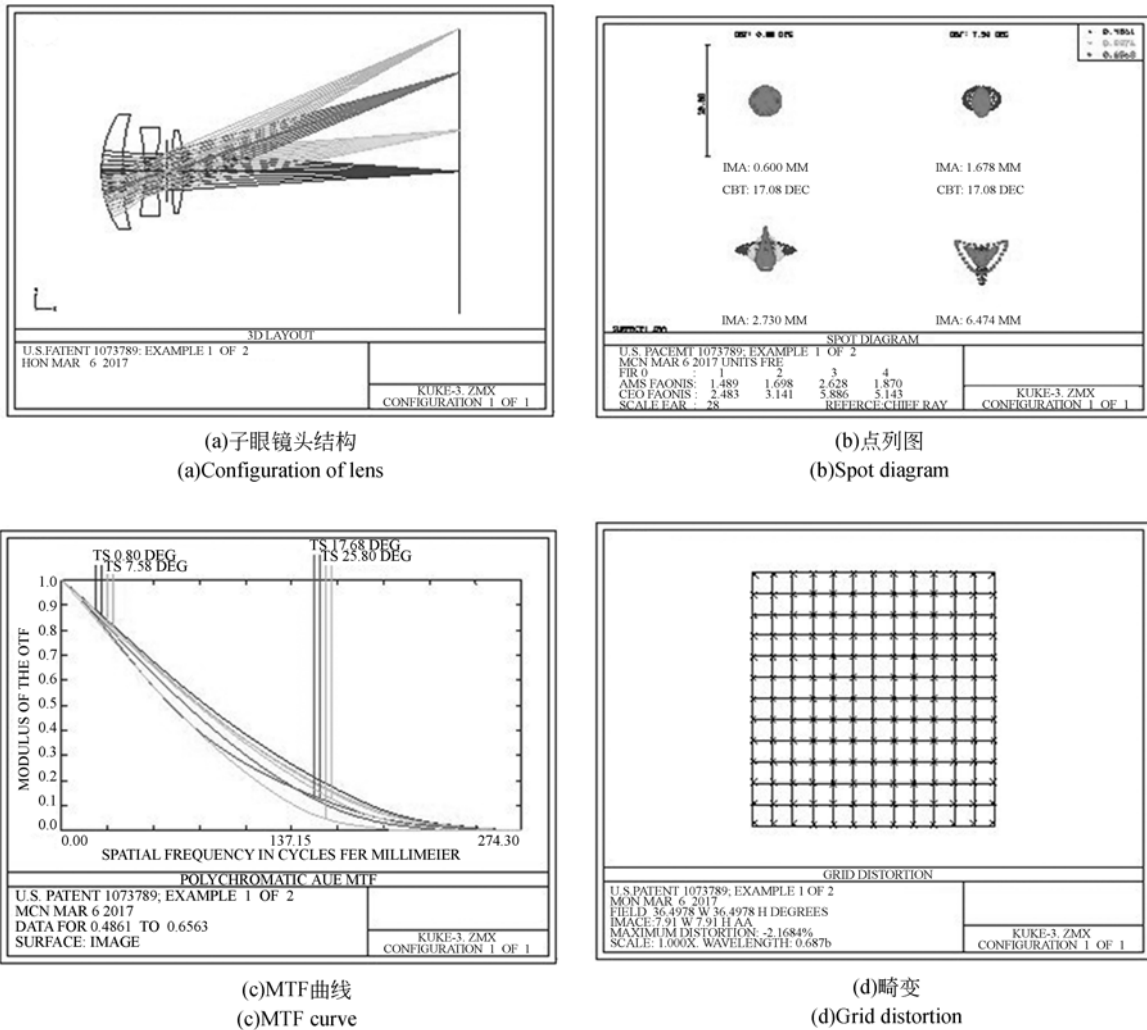


图 4 子眼透镜成像特性分析

Fig. 4 Structure characteristics of lens imaging system

3.3 光束偏转元件参数设计及透光性能分析

系统采用一片光探测阵列作为图像接收平面,各成像通道同时汇聚到光探测阵列上会产生图像重叠;且第二级成像通道与中心轴线存在夹角,若直接在光探测阵列上成像,采集的图像会出现较大变形。折转元件可以将偏离中心轴线的光线进行偏转,从而均匀地投射到光探测阵列上,不仅能够有效扩大系统的整体视场角度,提高边缘成像质量,还能减小成像系统体积。

选择光纤面板时,要考虑其主要的性能指标分辨率、透光性能和刀口响应等。光纤面板的分辨率主要由单纤维直径而定,纤维越细,分辨率越高。通过计算与现有产品型号,选用丝径为 $4\ \mu\text{m}$ 的光纤面板。实际应用中光纤面板要透光性能良

好、光损失少。为测试光学纤维面板的透光性能,在有无光纤面板的条件下分别对同一副图像拍照,测试所用的光纤面板为毛坯件,上下表面均未经过抛光处理,保持相同光照强度条件下拍摄,取相同位置进行标记,记为 L_{ob} 和 L_{AB} ,分别如图 5(a)、5(b)所示。分析标记直线 L_{ob} 和 L_{AB} 上各点的光强变化,图 5(c)所示为在有无光纤面板时直线 L_{ob} 和 L_{AB} 上光强的变化曲线。分析变化曲线可以得出光线经过光纤面板后的强度变化情况。

由图 5(c)可知,光线经过光纤面板后光强降低 25% 左右,图像分辨率降低。通过表面抛光、表面镀膜、后期数字化处理等手段可以有效增加入射光线的能量强度,提高图像分辨率。

传统的单通道成像系统通过增加透镜片数或

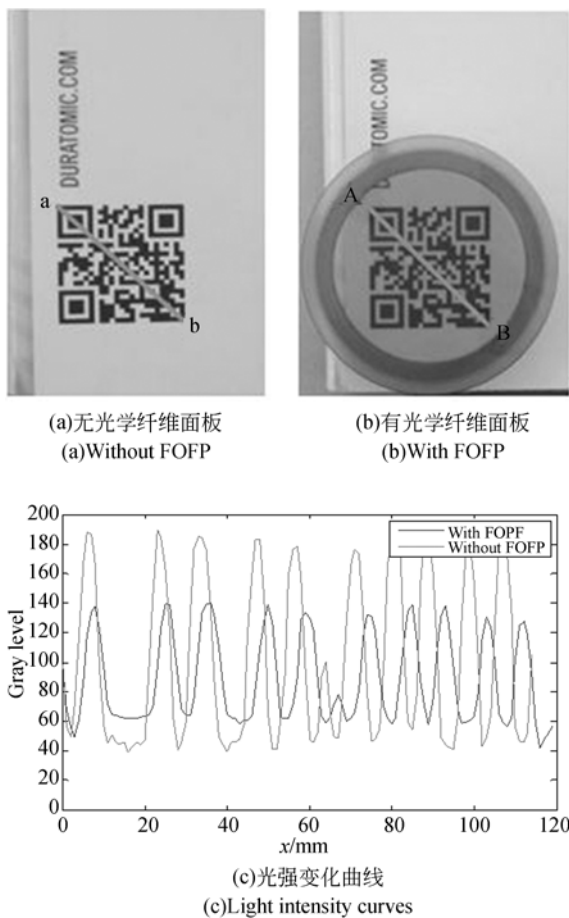


图 5 光学折转元件的通光效率

Fig. 5 Optical efficiency of Fiber-Optic Faceplate (FOFP)

增大透镜尺寸来提高成像系统的视场角度,整体尺寸较大且成本较高。本文提出的成像系统通过增加成像通道数量来扩大视场角度,该方法不仅可以减小系统体积,而且能够提高视场边缘的成像质量。多通道成像系统采用光纤面板作为折转元件,实现第 2 级成像通道的光线偏转,能够在扩大视场的同时提高视场边缘的成像质量。将光纤面板与光探测阵列进行耦合,可以提高折转元件与光探测阵列之间的定位精度,充分地利用光探测阵列的有效区域。改变光纤面板各面的尺寸或抛光角度可以调整各成像通道的焦距及视场范围。折转方案有组合式和整体式两种不同的形式,如图 6 所示。其中,组合折转元件方案可以最大限度提高离轴光线的使用效率,有效改善边缘成像质量,但存在抛光复杂、定位不精确、成像不连续等问题。整体折转元件方案可以根据系统视场角度及透镜位置确定整体折转元件的外形尺

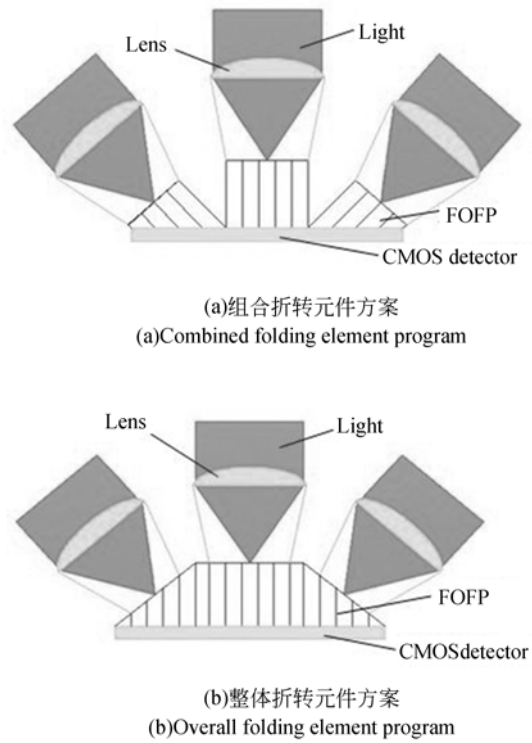
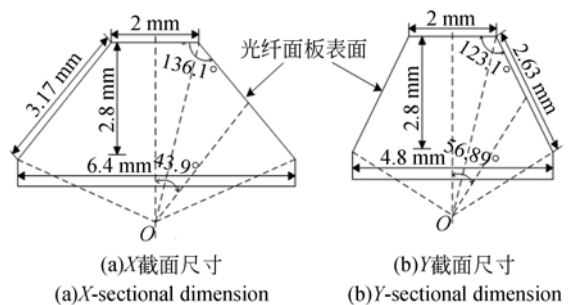


图 6 折转元件方案

Fig. 6 Layout of deflector element schemes

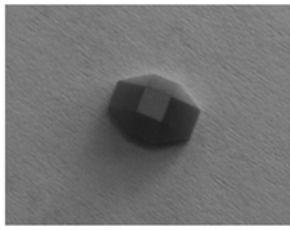
寸,同样可以提高离轴光线的使用效率,而且方便与光探测阵列耦合定位。因此,本文采用整体折转元件方案。

为充分利用光探测阵列的有效成像区域,抛光后光纤面板的底面与有效成像区域的面积相等,其余各面角度不仅要满足系统整体视场角度的要求,而且要保证各子眼能够准确聚焦到子平面上,完成光线的折转。光纤面板各面角度及抛光后的形状如图 7 所示。为降低由于光纤面板表面反射光线而导致的能量损失,提高光纤面板的透光性能,对抛光后面板的各表面镀增透膜,以增加各表面的通光量。



(a) X-sectional dimension

(b) Y-sectional dimension



(c)抛光后形状
(c) Polished shape

图 7 光纤面板外形及尺寸
Fig. 7 Shape and size of FOFP

3.4 成像通道分布特征

根据光纤面板的抛光角度及单个成像通道的视场范围,可以确定各成像通道在球壳上的分布位置。光纤面板各抛光表面作为成像透镜的聚焦平面,其成像通道长度应与各成像透镜的焦距相匹配。为确定各成像通道的位置和偏转角度,以中心子眼为坐标原点,建立多通道仿生复眼成像系统的坐标系,如图 8 所示。

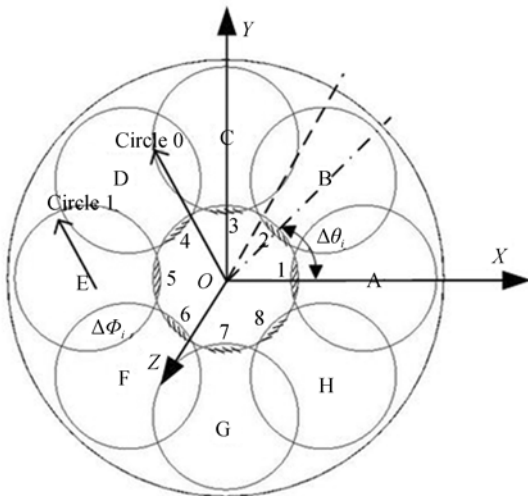


图 8 复眼结构的视场俯视图

Fig. 8 FOV of compound eye structure

图 8 中,圆形区域标识单个成像通道的成像视场范围,相邻成像通道间存在视场重叠,为后期图像拼接及融合过程提供必要的重合区域。 $\Delta\theta$, $\Delta\Phi$ 分别为各成像通道与 X 轴和 Z 轴的夹角。为快速低成本的进行实验,9 个成像通道分成两级布置在球形支架上。第 1 级为中心成像通道,记为 O,第 2 级围绕 Y 轴阵列 8 个成像通道,记为 A~H。系统整体的视场角度可达 120° ,各成像通道与 X、Z 轴的夹角如表 3 所示。

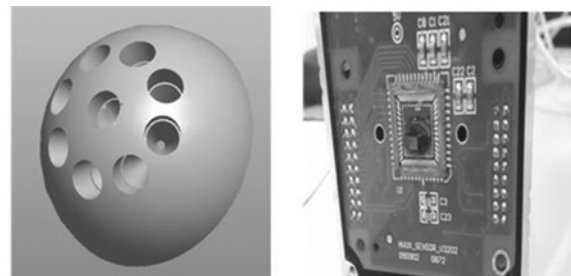
表 3 各子眼成像通道与 X、Z 夹角

Tab. 3 Intersection angles between sub-eye imaging channels and X or Z axis respectively

i	O	A	B	C	D	E	F	G	H
$\Delta\theta/(^\circ)$	0	0	45	90	135	180	225	270	315
$\Delta\Phi/(^\circ)$	0	43.9	60.1	56.8	60.1	43.9	60.1	56.8	60.1

4 系统试验台搭建及实验分析

计算各通道的分布位置及夹角,绘制球形支架三维模型,如图 9(a)所示。采用精密五轴数控机床加工球形支架及各成像通道,成像通道相互独立,通道形状为锥形,锥形通道末端孔径作为成像光阑。通道长度与成像透镜的焦距相等。透镜安装位置处加工细牙螺纹,通过调整透镜旋入深度,调整各成像通道的焦距,获得最佳的成像质量。完成抛光、镀膜后的光纤面板与光探测阵列耦合连接,如图 9(b)所示。耦合连接可以提高光纤面板的定位精度,使各成像通道准确聚焦。耦合过程中,光纤面板与光探测阵列牢固封接,耦合胶均匀、无气泡产生。



(a)子眼通道分布 (b)FOFP与CMOS耦合
(a) Distribution of lens channels (b) FOFP coupled with CMOS

图 9 子眼透镜分布及耦合元件

Fig. 9 Lens holder and coupling elements

自然光条件下开展实验,测试多通道仿生复眼成像系统的成像质量,采集室内环境图像,观察系统 X 方向上 A、O、E 3 个镜头的成像效果,利用计算机对输出后的图像进行数字化处理,处理后 3 个方向上的图像,如图 10 所示。

对 A、O、E 三通道采集的图像进行拼接,拼接后的图像如图 11 所示。拼接过程中,3 幅图像的重叠区域作为特征匹配区域。拼接后系统边缘图像质量较好,且整体视场角度明显扩大。

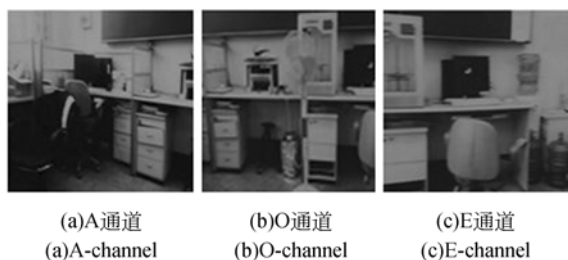


图 10 X 方向 A,O,E 通道的采集图像

Fig. 10 Images along X-axis captured by artificial compound eyes



图 11 A,O,E 通道拼接图像

Fig. 11 Mosaic image of A,O,E channels

实验表明,该系统 X 方向上的视场角度可达

120°, 光纤面板可以有效扩大系统整体的视场角度。同时,采用多成像通道方法可以在保证整体视场角度的前提下大大的缩小系统体积。然而,由于球形支架与耦合面板装配不精确,光纤面板抛光表面存在反射以及成像透镜对焦不准确等因素限制,势必会影响采集图像清晰度。单个成像透镜在扩大成像角度势必会降低其本身的成像距离。因此,如何保证整体视场角度的条件下增加系统的成像距离以及提高系统整体的成像质量将是下一步研究的重点。

5 结 论

本文设计了一种新型多通道大视角复眼成像系统,在此基础上分别讨论了成像单元参数计算、成像透镜设计优化、光纤面板性能、成像通道分布角度和光纤面板之间的位置关系。该系统采用多个成像透镜阵列分布,引入光纤面板作为转折元件,将不同成像通道的光线聚焦到光探测阵列上,从而在扩大系统整体视场角度的同时改善了边缘通道的成像质量。

参考文献:

- [1] LU C, LI M, XIAO J, *et al.*. Mechanics of tunable hemispherical electronic eye camera systems that combine rigid device elements with soft elastomers [J]. *J. Appl. Mech.*, 2013, 80(6):061022.
- [2] FLOREANO D, PERICET-CAMARA R, VIOLLET S, *et al.*. Miniature curved artificial compound eyes[J]. *PNAS*, 2013, 110:9267-9272.
- [3] 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 eye[J]. *Optical Technique*, 2006, 32:10-12. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 芦丽明,王国峰,张科,等. 蝇复眼在导弹上的应用研究[J]. *红外技术*, 2001, 23(5):9-10.
LU L M, WANG G F, ZHANG K, *et al.*. Research on multi-mode missile based on ommateum [J]. *Infrared Technology*, 2001, 23(5):9-10. (in Chinese)
- [7] DUPRRE J. Microoptical telescope compound eye [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3):889-903.
- [8] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6):555-559. (in Chinese)
- [9] 郭方,王克逸,闫佩正,等. 用于大视场目标定位的复眼系统校正[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5):913-920.
GUO F, WANG K Y, YAN P ZH, *et al.*. Calibration of compound eye system for target positioning with large field of view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5):913-920. (in Chinese)
- [10] 曹兆楼,詹珍贤,王克逸. 用于运动目标探测的球

面复眼透镜的结构设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 70-73.

CAO ZH L, ZHAN ZH X, WANG K Y. Structural

design of spherical compound eye lens for moving object detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 70-73. (in Chinese)

作者简介:



郝永平(1960—),男,辽宁沈阳人,博士,教授,2004年于北京理工大学获得博士学位,现为沈阳理工大学装备工程学院院长,主要从事智能仿生和微机电系统方面的研究。E-mail: yphsit@126.com



刘凤丽(1975—),女,辽宁朝阳人,博士,副教授,2007年于沈阳农业大学获得博士学位,主要从事 MEMS 器件设计与加工方面的研究。E-mail: lfengli2003@126.com

通讯作者:



李 伦(1989—),男,山东潍坊人,博士研究生,2013年于沈阳理工大学获得硕士学位,主要从事仿生复眼及仿生扑翼飞行器方面的研究。E-mail: ll408907652@163.com