

doi:10.3788/gzxb20144311.1122001

# 视场拼接复眼成像系统结构及装调方法

高天元,董正超,赵宇,刘智颖

(长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

**摘 要:**提出了以高分辨率、小视场的子镜头为中心,曲面阵列化排布多个分辨率较低、视场大的边缘阵列子镜头的人工仿生复眼的结构形式.基于物方视场空间应该保证无缝拼接并尽量缩小重合区域的原则,分析并得到子镜头在 X 方向和 Y 方向上视场角与复眼系统总体视场角的数学关系式,推导出了边缘阵列子镜头的周期阵列数  $n$  的数学模型,确定了子镜头在曲面上的阵列排布方式.依据曲面阵列排布形式设计了子镜头曲面固定本体,提出了利用自带光源的自准直经纬仪及计算机图像处理技术的装调方法.在实际装配和调整过程中,完成了中心子镜头和边缘第一阵列子镜头的安装,利用该系统采集图像数据,结果表明:物方视场空间的实际重合区域与理论设计一致.

**关键词:**仿生复眼;成像系统;视场拼接;装调;结构设计;曲面阵列;光学设计与制备

**中图分类号:**Q692;O439

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2014)11-1122001-6

## Structure and Alignment of Field Stitching Compound Eye Optical Imaging System

GAO Tian-yuan, DONG Zheng-chao, ZHAO Yu, LIU Zhi-ying

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A structure of artificial compound eye was put forward which was centered on high-resolution and small field of view sub-eye lens and has many large FOV and low-resolution sub-eye lens on the curved surface by array configuration. Based on the principle that object field should be seamless stitching and reduce overlap regions, the mathematical relationship between the field angles of sub-eye lens in the X direction and Y direction and the one of the whole compound eye system was analyzed, the mathematical model about the period of marginal array sub-eye lens was deduced. And then, the arrangement criterion of the sub-eye lens array on curved surface was confirmed. The spherical surface part was designed by the arrangement criterion, an alignment method with using of the auto-collimating theodolite and the digital picture processing technique was proposed. The central sub-eye lens and marginal first array sub-eye lens was assembled in the course of adjustment. The results of image data acquisition show that overlap regions of objective field are the same as the theory design, which confirms the arrangement of sub-eye lens is reasonable and the alignment is feasible.

**Key words:** Bionic compound eye; Image system; Field stitching; Alignment; Structure design; Curved surface array Optical design and fabrication

**OCIS Codes:** 220.1140;220.3620;220.4830;220.2740;220.4610

## 0 引言

人们在使用光学成像系统进行探测识别实践中,对系统的要求越来越高,传统单孔径光学成像系统已无法满足人们的应用需求,特别是在军事领域,对于目

标的识别、定位、跟踪等暴露出的问题尤为明显.其中最主要的矛盾是单孔径光学成像系统的大视场和高分辨无法同时满足<sup>[1-2]</sup>.如果采用复杂的光学结构,例如采用衍射器件增大视场角,但是受到衍射效率的制约以及二级光谱矫正难度较大等因素影响,很难保证其

基金项目:吉林省自然科学基金(No.201215131)资助

第一作者:高天元(1970-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光学仪器与结构. Email:gty@cust.edu.cn

通讯作者:董正超(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为现代光学技术及工程应用. Email:alading23@126.com

收稿日期:2014-07-31;录用日期:2014-09-19

<http://www.photon.ac.cn>

成像质量,其次衍射器件的加工工艺较为复杂,制备成本较高<sup>[3-4]</sup>.因此如何利用新的结构形式来增大光学成像系统的视场角而又不牺牲分辨率成为近年来的研究热点和难点.

在仿生光学领域,昆虫复眼结构成为突破这一矛盾的关键要素.该结构因其体积小,视场大对运动目标捕获分辨率明显等优势给科学家以启示.受昆虫复眼结构形式的启发,近年来,日本科学家致力于平面型复眼阵列的研究并加工制备了集成化较高的复眼成像系统<sup>[5-6]</sup>,但由于各个子眼成像通道是平面排列,所以该系统视场角很小,其次由于口径的限制,无法对远距离目标清晰成像.目前,各国科学家对仿生复眼光学结构的研究思路主要是以微透镜阵列的加工和制备为主<sup>[7-14]</sup>,但是大视场的曲面微透镜阵列的加工工艺依然是限制其发展的主要因素,由于面型的影响,场曲和畸变很难得到保证,分辨率也相对较低,因此成像质量相对较差.

本文提出一种子眼镜头阵列化曲面排布的大视场复眼结构,其中心为一个视场小分辨率高孔径相对较大的子眼镜头,围绕中心子眼系统阵列化排布在曲面上视场大分辨率相对较低孔径较小的子眼镜头.并对此开展视场拼接、光学系统布局和装调方法等方面的研究,通过实验验证了排列布局合理,装调方法可行,为后续的工程应用奠定了基础.

## 1 视场拼接原理及镜头排布方式

### 1.1 视场拼接的数学模型

设计中,每一个子眼镜头都是一个独立的单孔径光学系统,按照一定的数学规则排布在曲面球罩上面.对于每一个子眼镜头而言,依据物像共轭关系,系统的入射窗与出射窗形状相同,在一次成像系统中,探测器矩形工作像面往往会作为视场光阑,所以在复眼系统视场拼接过程中实际物方视场空间应为矩形.因此,对于焦距为  $f'$ ,探测器像面尺寸为  $X \times Y$  的探测器,视场拼接分为  $X$  方向( $\omega_x$ )视场拼接和  $Y$  方向( $\omega_y$ )视场拼接.

在系统子午面内视场拼接又称为系统纵向视场拼接.如图1,假设复眼系统总体视场角为  $2W$ ,图中  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  分别是中心子眼系统在  $\omega_x$  方向半视场角,边

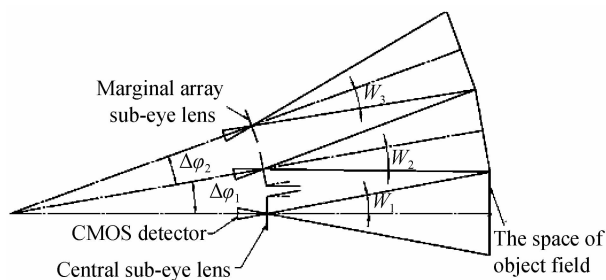


图1 系统纵向视场拼接

Fig. 1 System longitudinal FOV stitching picture

缘第一阵列子眼系统其中一基元在  $\omega_y$  方向半视场角,边缘第二阵列子眼系统其中一基元在  $\omega_y$  方向半视场角,  $\Delta\varphi_1$ ,  $\Delta\varphi_2$  为相邻子眼系统光轴夹角.

在视场拼接过程中应该遵循物方视场空间无盲区的原则,同时考虑到各个子眼镜头应存在机械间隔(固定镜头空间),因此上述参量应该满足式(1)~(3)

$$W_1 + W_2 \geq \Delta\varphi_1 \quad (1)$$

$$W_2 + W_3 \geq \Delta\varphi_2 \quad (2)$$

$$W = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + W_3 \quad (3)$$

假设  $\theta_{i,i+1} = W_i + W_{i+1} - \Delta\varphi_i$  ( $i=1, 2, 3 \dots$ ), 则有

$$\tan \theta_{i,i+1} = \frac{d_{i,i+1}}{l_{i,i+1}} = \frac{D_{i,i+1}}{L - l_{i,i+1}} \quad (4)$$

式中,  $d_{i,i+1}$  为相邻子眼系统间的机械间隔;  $D_{i,i+1}$  为相邻子眼镜头视场重合的纵向宽度;  $l_{i,i+1}$  为相邻子眼镜头视场重合起始位置距离复眼系统的距离;  $L$  表示复眼系统的工作距离.

设 CMOS 探测器光敏面尺寸为  $x \times y$ , 子眼系统的焦距为  $f'$ , 则边缘子眼镜头系统绕中心子眼镜头系统光轴方向周期阵列数  $n$  的数学表达式为

$$n = \frac{2f' \pi \sin \left( \Delta\varphi_i + \arctan \left( \frac{x}{2f'} \right) \right)}{y} \quad (5)$$

依据推导出的视场拼接的数学模型可以最终确定大孔径仿生复眼光学系统各子眼镜头的曲面阵列排布形式,进而实现视场空间无盲区全覆盖.

### 1.2 子眼镜头阵列化曲面排布方式

依据 CMOS 探测器的光敏面尺寸参量  $4.51 \text{ mm} \times 2.88 \text{ mm}$ , 结合视场拼接原理,在人工仿生复眼光学成像系统全视场  $60^\circ$  指标要求下,最终确定中心子眼镜头和边缘阵列子眼镜头的光学参量以及子眼镜头的阵列化曲面排布方式.在实际成像过程中,边缘阵列子眼系统主要用来对目标的捕获定位,要求视场较大分辨率相对中心子眼镜头较低,所以焦距短,而中心子眼系统主要用来对目标的识别跟踪,所以其视场小分辨率高,因此焦距较长.表1为子眼系统光学参量表.

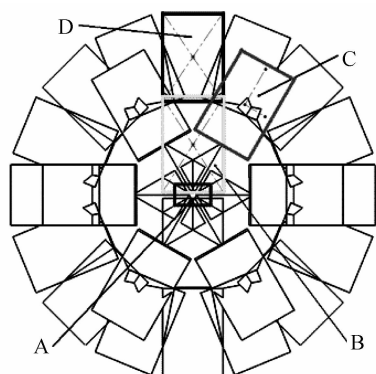
表1 子眼系统光学参量表

Table 1 Sub-eye lens system optical parameters

	Central sub-eye lens	Marginal array sub-eye lens
Field of view	$5.1^\circ$	$15.2^\circ$
Focal length	60 mm	20 mm
$F$	2.3	2.6

以中心子眼系统光轴为基准,边缘第一阵列子眼系统光轴与其基准光轴夹角  $\Delta\varphi_1 = 7.8^\circ$ ,边缘第二阵列子眼系统光轴与其基准光轴夹角  $\Delta\varphi_2 = 13^\circ$ ,以此类推,  $\Delta\varphi_3 = 20.5^\circ$ .以中心子眼系统镜头探测器像面位置为基准即工作像面在垂直于系统光轴方向并未发生旋转,对边缘阵列子眼镜头进行标号,每一层的1号镜头

为图2中所标出的物方视场空间所代表的基元,顺时针依次标记为2,3,4...号镜头,所以每一个边缘阵列子眼系统探测器工作像面在垂直于各自光轴方向的旋转角如表2.按照四象限坐标系标定角度值.



A: The object field space of center sub-eye lens; B: The object field of first array sub-eye lens; C: The object field of second array; D: The object field of third array

图2 物方视场空间模拟图  
Fig. 2 Object field space simulated diagram

表2 子眼镜头探测器垂直光轴方向旋转角

Table 2 Rotation angle of sub-eye lens CMOS in the direction of perpendicular to optical axis

	Marginal first array sub-eye lens	Marginal second array sub-eye lens		Marginal third array sub-eye lens
			1	90°
1	90°	60°	2	67.5°
			3	45°
			4	22.5°
2	30°	0	5	0°
			6	-22.5°
			7	-45°
3	-30°	-60°	8	-67.5°
			9	-90°
			10	-112.5°
4	-90°	-120°	11	-135°
			12	-157.5°
5	-150°	180°	13	180°
			14	157.5°
6	150°	120°	15	135°
			16	112.5°

## 2 仿生复眼系统结构及装调方法

依据复眼镜头在曲面上的阵列排布规律,结合边缘阵列子眼光学系统与中心子眼光学系统的光轴夹角和各个子眼镜头探测器工作像面在其垂直于光轴方向的旋转角两个重要参量要求,设计球面固定本体,如图3.该本体采用精密五轴加工中心进行加工,因为五轴加工中心轴向转角准确度可以达到角秒级,也就是孔位的轴线方向均指向球面固定本体的球心,并且各个孔位轴线夹角满足设计值.当各个子眼镜头安装调试

后,可确保子眼系统的光轴夹角满足设计要求.

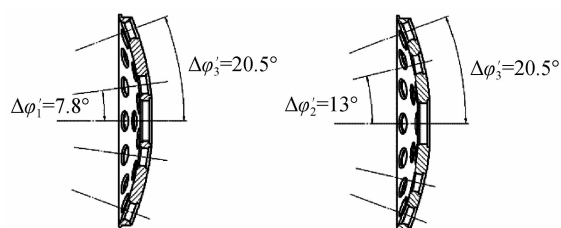


图3 球面固定本体剖视图

Fig. 3 Cutaway view of spherical surface part

### 2.1 中心及边缘阵列子眼镜头的结构及装调方法

根据给定的光学参量,结合系统的小型化简单集成化等要求,最终确定中心子眼镜头的光学结构形式为四片式,边缘阵列子眼镜头的光学结构形式为三片式,具体形式如图4.

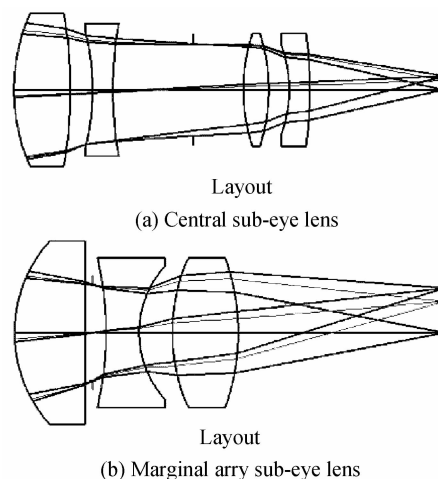


图4 子眼镜头 zemax 光路图

Fig. 4 Sub-eye lens ZEMAX optical axis

无论是中心镜头还是边缘阵列子眼镜头均采用同一款 CMOS 探测器,并且该探测器光敏面芯片封装在外径为 30 mm PCB 板内.依据现在比较成熟的装调方法,采用修切垫片的方式调整子眼镜头物镜像面位置与 CMOS 探测器光敏面的轴向距离<sup>[15]</sup>,通过螺纹连接最终达到二者重合,如图5.

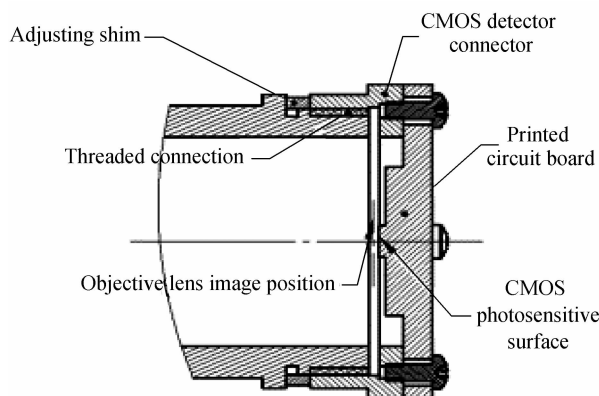


图5 COMS 探测器连接固定方式

Fig. 5 CMOS detector fixed form

## 2.2 仿生复眼光学成像系统的装调方法

当中心子眼镜头及边缘阵列子眼镜头装配和测试完成之后,如何将这 29 个子眼镜头安装在曲面固定本体上是此次装调的难点,按照子眼镜头在曲面上的排列分布规律以及表 2 给出的重要参量要求,本文提出一种利用自准直经纬仪以及计算机图像处理技术来完成各个子眼镜头的安装调试方法。

### 2.2.1 自准直经纬仪辅助装调方法

本文采用自带辅助光源的自准直经纬仪进行装调,其内部在物镜的焦面位置上安装有十字丝分划板,当有辅助光源对其照射时,通过调整物镜焦平面的位置,经纬仪会向外发出一束平行光模拟无穷远处景象,通过中心子眼镜头的接收,可以在其像面上形成清晰的十字丝像,将十字丝像的交点调整至像面中心位置,此时可认为经纬仪的光轴与系统光轴严格平行,记录经纬的角度数据,保证经纬仪的水平转角不变,俯仰角相应转动  $\Delta\varphi_i$ 。

设计球面固定本体内工装,如图 6,可以使球面固定本体的旋转机械轴调整至与中心子眼镜头的光轴平行,将边缘阵列子眼镜头插入任意孔位并旋转本体,当十字丝像调整至边缘阵列子眼镜头的像面中心时,说明:1)两个系统的光轴满足了设计值  $\Delta\varphi_i$ ;2)两系统光轴所在平面与铅垂方向平行.此方法适用于  $\Delta\varphi_i$  较小以及镜头口径较小的情况,否则需要两台经纬仪,在水平面内经过互瞄对准一次进而确定边缘子眼镜头的装调基准进行调整<sup>[16]</sup>,其原理是相同的。

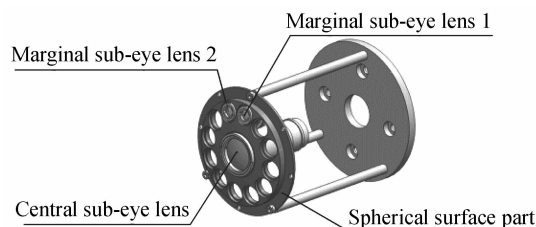


图 6 球面固定本体内工装模型  
Fig. 6 Spherical surface part fixture

光轴夹角  $\Delta\varphi_i$  的严格保证是各个子眼镜头物方视场空间重合区域精确控制的关键,在保证没有盲区的前提下,物方视场空间的重合区域越小越好,可以为后期图像处理提供精确的重合空间。

### 2.2.2 计算机图像处理技术辅助装调

根据物方视场空间的分布情况,实际子眼镜头的视场窗在垂直于光轴的方向上有一定的旋转角度,按照表 2 所给出的各个子眼镜头相对于中心子眼镜头 CMOS 探测器工作面的旋转角度参量,决定采用计算机图像处理技术进行辅助装调。

将采集到的十字丝像用 MATLAB 编写的图像处理程序进行处理,其原理是应用霍夫变换和最小二乘法拟合直线,并计算直线的斜率.通过斜率值可以确定

像面视场窗在垂直于光轴方向上旋转了多少角度,进而为子眼镜头的装配调试提供参考依据。

当子眼镜头的光轴与自准直经纬仪的光轴严格平行时十字丝像的交点位于像面的视场中心,如果子眼镜头的视场窗在垂直于光轴方向并未发生旋转,经子眼系统最终采集到的图像如图 7(a)。

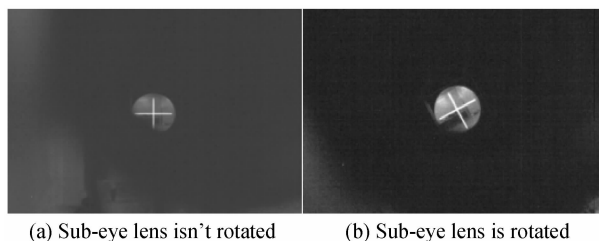


图 7 经纬仪十字丝像  
Fig. 7 Picture of optical theodolite reticule

当子眼镜头的视场窗在垂直于光轴方向发生旋转时,经子眼系统最终采集到的图像如图 7(b)。在此过程中需要强调,经纬仪作为辅助参考提供十字丝像,利用经纬仪自身的安平装置,将仪器调制与大地水平然后将经纬仪固定不动,进行子眼镜头的装调.在旋转过程中十字丝像的交点要始终落在探测器像面的几何中心上。

## 3 实验

实验本着节约成本的原则并没有采用 29 个镜头的设计.从装调的过程分析,对于同一阵列的边缘子眼镜头的装调方法是一样的,对于不同阵列的边缘子眼镜头的装调过程的区别在于  $\Delta\varphi_i$  的不同,因此,为了验证本次提出的装调方法的可行性,只加工装配了中心子眼镜头和两个边缘阵列子眼镜头.依据视场拼接的数学模型,球面固定本体采用  $\Delta\varphi_i = 7.8^\circ$  一层阵列的设计,阵列孔位设计为 12 个。

为了保证球面固定本体可以在垂直于中心子眼系统光轴方向上自身进行旋转,设计了球面固定本体的辅助工装,并将其固定在电控五维调整架的旋转台上,如图 8。

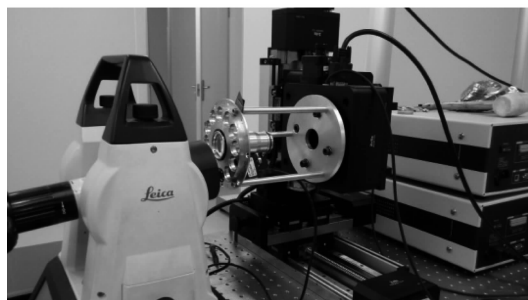
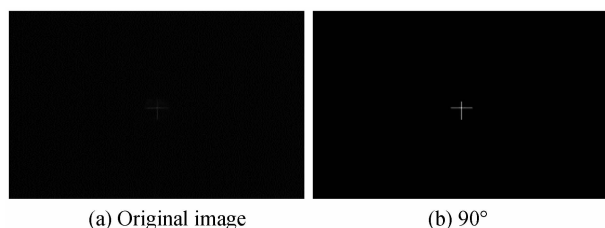


图 8 装调实验过程  
Fig. 8 Optical adjustment experiments

通过调整,当旋转台工作时,经纬仪的十字丝像的交点在探测器像面的中心位置不动,表明经纬仪的光

轴,中心子镜头的光轴严格平行并保持一致,与此同时两根光轴和旋转机械轴均保持平行,确保了系统整体装调同轴度的要求。

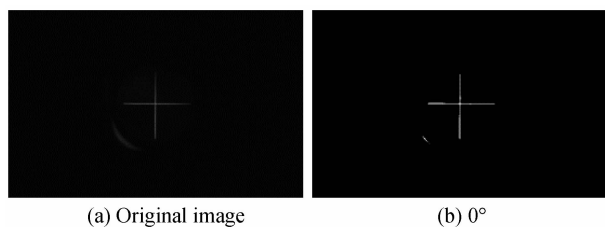
利用 2.2.1 所述装调方法,当边缘阵列子镜头调整至其光轴和经纬仪的光轴严格平行时,开始对子镜头整体旋转,当从十字丝像的处理数据中读出  $90^\circ$  时停止旋转,用螺纹压圈将镜头固定,完成一个子镜头的装调,如图 9。



(a) Original image

(b)  $90^\circ$ 图 9 子镜头旋转  $90^\circ$  时图像处理结果Fig. 9 The processing images results when sub-eye lens rotated  $90^\circ$ 

利用电控旋转台,旋转调整球面固定本体,将下一个边缘阵列子镜头安装至相邻孔位并调整,直至镜头全部装调完毕。在整个装调边缘阵列子镜头时,经纬仪始终保持不动。当完成边缘阵列子镜头的装调后,将经纬仪复位,只需调整经纬仪的俯仰角,重新将十字丝像调制探测器像面中心位置,单独旋转中心子镜头直至从十字丝像的处理数据中读出  $0^\circ$  时,如图 10,停止旋转。至此,系统整体装调结束。



(a) Original image

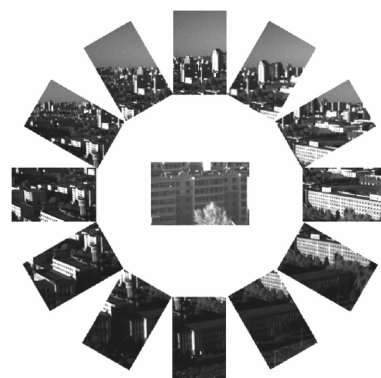
(b)  $0^\circ$ 

图 10 中心子镜头未发生旋转时图像处理结果

Fig. 10 The processing images results when center lens rotated  $0^\circ$ 

在本次装调实验过程中,为了获得图像数据,在完成一个孔位的子镜头 1 的安装调整之后,采集一幅图像,旋转曲面固定本体至相邻孔位安装另一个子镜头 2,当 2 号子镜头安装调试完毕后,利用 1 号镜头再次采集图像,所以每一次只对相邻孔位进行 2 号子镜头的安装,利用 1 号镜头采集图像。获得图像数据如图 11(a)。

对采集到的图像数据进行视场拼接,如图 11(b),从图中可以看到相邻子镜头采集到的图像经拼接处理后获得的重叠区域与最初设计的物方视场空间重合度保持一致,实现了物方视场空间的全覆盖,表明子镜头布局合理,装调方案切实可行。



(a) The FOV of central and marginal array sub-eye system



(b) Object field stitching picture

图 11 图像采集结果

Fig. 11 Image collection results

## 4 准确度分析

分析整个装调实验过程发现,装调误差的主要来源是十字丝像的交点对准 CMOS 探测器像面几何中心时的对准误差,以及探测器矩形视场窗旋转时的,利用 MATLAB 软件处理图像上带来的误差。

实验采用的是莱卡 5100 自带光源的自准直经纬仪进行辅助装调,经纬仪在使用过程中误差允许值为  $\Delta\sigma_{YZ} = 2''$  也就是经纬仪测量误差最大值<sup>[17]</sup>。在十字丝像交点对准过程中,由于系统分辨率以及成像质量等原因,交点像与探测器像面几何中心实际上会存在 2~3 个像元的偏差,记为  $\Delta$ ,又已知中心子镜头的焦距  $f_1 = 60$  mm,边缘阵列子镜头的焦距  $f_2 = 20$  mm,实验采用的 CMOS 探测器的像元尺寸  $i$  为  $6 \mu\text{m}$ ,利用公式

$$\Delta\sigma = \arctan\left(\frac{i\Delta}{f'}\right) \quad (6)$$

计算得到  $\Delta\sigma_1 = 1'1.8''$ ,  $\Delta\sigma_2 = 3'5.4''$ ,对于中心子眼系统与边缘阵列子眼系统光轴夹角的装调准确度

$$\Delta\sigma_Z = \sqrt{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2 + \Delta\sigma_{YZ}^2} \quad (7)$$

代入数据得  $\Delta\sigma_Z = 3'15''$ 。

应用 MATLAB 软件处理图像时,以目前系统采

集到的像质情况,软件拟合直线并运算斜率确定角度的误差为 $0.1^\circ$ .

从准确度分析过程中可以看出, $\Delta\sigma_z$ 影响中心子镜头与边缘阵列子镜头光轴之间的夹角 $\Delta\varphi_i$ ,MATLAB软件处理图像时带来的误差影响边缘阵列子镜头在垂直于光轴方向的旋转角度,这两个误差直接影响各子镜头物方视场空间的重叠区域.所以有效减少装调时的误差可以精确控制仿生复眼物方视场空间的重叠情况,进而为后期数据处理,以及目标识别定位提供重要的参考依据.

## 4 结论

本文在传统光学系统无法解决大视场和高分辨率矛盾的情况下,提出了人工仿生复眼的光学结构形式,以分辨率高、视场小的中心子镜头为中心,曲面阵列排布多个分辨率较低但视场较大的子镜头,按照物方视场空间无缝拼接且重合度较少的原则,确定了子镜头曲面阵列的排布形式.以此为依据进行了系统的机械结构的设计,利用自带光源的自准直径经纬仪和MATLAB软件图像处理进行装调.实验以及准确度分析表明,此种球面固定本体的结构形式可以为子镜头的装配调整提供可靠保证.从采集到的图像数据上看,该装调方法可以满足现阶段物方视场空间的重叠度要求.为29个子镜头的加工装配提供了数据支持,为系统未来的工程化、集成化奠定了基础.

### 参考文献

- [1] ZHANG Hong-xin, LU Zhen-wu, LI Feng-you, *et al.* The building and analysis of overlap compound eye optical formulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1106-1109.  
张红鑫, 卢振武, 李凤有, 等. 重叠复眼光学模型的建立与分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1106-1109.
- [2] ZHANG Hong-xin, LU Zhen-wu, WANG Rui-ting, *et al.* Study on curved compound eye imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(3): 346-350.  
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): 346-350.
- [3] FLORES A, WANG M R, YANG J. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(30): 5618-5630.
- [4] HE Li-qing, WU Hai-sheng. Optical design of hybrid reflective/ diffractive system in large field[J]. *Laser Journal*, 1999, **20**(5): 15-16.  
贺莉清, 吴海生. 大视场折/衍混合系统光学设计[J]. *激光杂志*, 1999, **20**(5): 15-16.
- [5] YOSHIRO K, RUI S, KENJI Y, *et al.* Reconstruction of a high-resolution image-capturing system[J]. *Applied Optics* (S0003-6935), 2004, **43**(8): 1719-1727.
- [6] YOSHINORI A, SHOGENJI R, NORIMICH T, *et al.* Efficient gonio-imaging of optically variable devices by compound-eye image-capturing system[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(4): 3353-3362.
- [7] XU Yan, YAN Shu-hua, ZHOU Chun-lei, *et al.* Advance in bionic study on insects compound eye[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(s): 10-12.  
徐琰, 颜树华, 周春雷, 等. 昆虫复眼的仿生研究进展[J]. *光学技术*, 2006, **32**(s): 10-12.
- [8] CHEN Ming-jun, LIU Ye-sheng, LI Zi-ang, *et al.* New research progress in design and manufacture of artificial optical compound eye[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47**(1): 161-168.  
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.
- [9] XING Qiang, DAI Zhen-dong, WANG Hao. A rapid position estimation algorithm inspired of compound eyes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0612001-5.  
邢强, 戴振东, 王浩. 仿复眼的动目标位置快速估计算法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 0612001-5.
- [10] YAO Bao-li, LEI Ming, XUE Bin, *et al.* Progress and applications of high-resolution and super-resolution optical imaging in space and biology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1607-1618.  
姚保利, 雷铭, 薛彬, 等. 高分辨和超分辨光学成像技术在空间和生物中的应用[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1607-1618.
- [11] LI Hong-zhuang, ZHANG Zhen-duo, LIU Xin-yue, *et al.* Optical design of a wide spectral fish-eye lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1312-1316.  
李宏壮, 张振铎, 刘欣悦, 等. 一款宽光谱鱼眼镜头设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1312-1316.
- [12] TIAN Wei-jian, YAO Sheng-li, CHEN Li-rong, *et al.* Multi-channel imaging system for detecting moving object[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 47-49.  
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.
- [13] SONG Young-min, XIE Yi-zhu, MALYARCHUK V, *et al.* Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye[J]. *Nature*, 2013, **497**: 95-99.
- [14] LI Lei, ALLEN Y. Design and fabrication of a freeform microlens array for a compact large-field-of-view compound-eye camera[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(12): 1843-1852.
- [15] XIA Yuan-jie, DUAN Hong-jian, SHI Xin, *et al.* Structure design and adjustment of multiple-field-of-view fix-focal-length CCD camera system[J]. *Journal of Applied Optical*, 2012, **33**(2): 240-245.  
夏元杰, 重建, 石欣, 等. 多视场定焦距 CCD 摄像系统结构设计及装调[J]. *应用光学*, 2012, **33**(2): 240-245.
- [16] ZHANG Zi-li, ZHU Ji-gui, GENG Na, *et al.* The design of double-theodolite 3D coordinate measurement system[J]. *Chense Journal of Sensors and actuators*, 2010, **23**(5): 660-665.  
张滋黎, 郝继贵, 耿娜, 等. 双经纬仪三维坐标测量系统设计[J]. *传感技术学报*, 2010, **23**(5): 660-665.
- [17] DU Jun-feng, ZHANG Meng-wei, ZHANG Xiao-ming. Angle measurement accuracy of photoelectric theodolite[J]. *Journal of Applied Optical*, 2012, **33**(3): 466-474.  
杜俊峰, 张孟伟, 张晓明. 双经纬仪测角准确度分析[J]. *应用光学*, 2012, **33**(3): 466-474.