

仿生复眼系统的视场重叠率

李文轩¹, 胡源¹, 张凯¹, 秦铭泽¹, 袁夕尧¹, 刘天赐¹, 骆强²

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710077)

摘要: 为了实现复眼系统小型化、轻量化, 提出一种基于相机外凸式的安装结构。基于该种结构, 首先分析了子眼系统视场角之和与光轴夹角之间的关系, 通过两子眼系统视场边缘点之间的坐标关系, 建立了与子眼间光轴夹角、子眼系统视场角、观测距离相关的视场重叠率计算模型。通过对此模型分析, 复眼系统中子眼间光轴夹角应当小于子眼视场角之和, 且大于子眼视场角之差; 在上千米的观测距离下, 子眼间的视场重叠率随观测距离的变化趋向于定值。依据此模型设计了一款 19 孔径的复眼系统。针对 3 km 外目标搭建了实验, 采集了子眼图像数据, 实验结果表明, 复眼系统实现了 79.23° 全视场的无盲区监测, 1 级阵列间子眼的实际重叠率在 X、Y 方向分别为 71.16%、45.99%; 1 级与 2 级阵列间子眼在 X、Y 方向同时存在重叠时的实际重叠率分别为 43.00%、18.36%, 只在 X 方向存在重叠时的实际重叠率为 14.62%; 2 级阵列间子眼的实际重叠率在 X、Y 方向分别为 66.58%、24.6%。理论重叠量分别为 75%、40%; 40%、20%; 15%; 70%、30%。通过子眼实际重叠量与理论重叠量的对比分析, 验证了该视场重叠计算模型的可行性。

关键词: 视场重叠; 仿生复眼系统; 计算光学; 光学设计

中图分类号: Q692; TH702 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200435

Field of view overlap rate of bionic compound eye system

Li Wenxuan¹, Hu Yuan¹, Zhang Kai¹, Qin Mingze¹, Yuan Xiyao¹, Liu Tianci¹, Luo Qiang²

(1. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to realize accurate calculation of field of view(FOV) overlap between sub eyes of compound eye system, reduce the number of sub eye systems, and make the system miniaturized and lightweight, a FOV overlap calculation model was proposed. Firstly, the relationship between the sum of FOV and the included angle of optical axis was analyzed. Based on the coordinate relationship between the edge points of FOV, a calculation model of FOV overlap rate was established, which was related to the included angle of optical axis, the angle of FOV and the observation distance. Through the analysis of this model, the angle of the optical axis between the sub eyes in the compound eye system should be less than the sum of the field angles of the sub eyes, and greater than the difference of the field angles of the sub eyes; at the observation distance of more than 3 km, the overlap rate of the field of view between the sub eyes tends to be fixed with the observation distance. According to this model, a 19 aperture compound eye system was designed. The experimental results show that the compound eye system can achieve 79.23° full field of view without blind area monitoring. The actual overlap rate of sub eyes

收稿日期:2020-11-13; 修订日期:2020-12-11

基金项目:装备预研兵器工业联合基金(6141B012827)

作者简介:李文轩,男,硕士生,主要从事光学设计方面的研究工作。

导师简介:胡源,女,副教授,博士生导师,主要从事光学工程应用方面的研究工作。

between the first level array is 71.16% and 45.99% in the X and Y directions respectively; the actual overlap rates of the sub eyes between the first and second level arrays are 43.00% and 18.36% respectively in the X and Y directions, respectively. The actual overlap rate was 14.62% when there was overlap in direction X , and 66.58% and 24.6% in X direction and Y direction respectively. The theoretical overlaps were 75%, 40%, 40%, 20%, 15%, 70%, 30%, respectively. Through the comparative analysis of the actual overlap and theoretical overlap, the feasibility of the field overlap calculation model is verified.

Key words: field of view overlap; bionic compound eye system; computational optics; optical design

0 引言

复眼与单眼系统相比,复眼系统具有更广视野、体积小、结构更加紧凑^[1],但是空间分辨率相对较低。仿生复眼系统可广泛应用于模式识别^[2]、运动检测、机器视觉^[3]、遥感探测^[4]等领域。目前仿生复眼系统的基本存在两种类型:微透镜型^[5]复眼系统和视场拼接型复眼系统。由于视场拼接型复眼系统制备简单、分辨率高、光学像差较小、成本较低等优势特点。因此视场拼接型的复眼系统近几年来备受关注。

美国杜克大学^[6]设计了一种由一级同心物镜和二级子眼镜头阵列构成的 120° 大视场的复眼系统。天津大学房丰洲^[7-8]等人设计制造了由曲面透镜阵列和由 16 片像元尺寸为 $7.4\ \mu\text{m}\times 7.4\ \mu\text{m}$ 、分辨率为 704×576 的 CCD 传感器组成高分辨率曲面传感器的复眼系统,系统具有 $180^\circ\times 75^\circ$ 的视场。空空导弹研究院的燕飞^[9]等人设计制造了一套 3×3 的球面仿生复眼系统,球面半径为 60 mm、单子眼系统视场角达到 30° ,整体系统具有 $106^\circ\times 140^\circ$ 的大视场。北京理工大学^[10]曹杰等人设计制造了一种由球面形式构成,利用 11 个相机构建的相机阵列,组成了四个等级分辨率的子眼拍摄模块,系统达到了 $150^\circ\times 37.8^\circ$ 的大视场特性。长春理工大学赵宇^[11-14]等人设计的 31 组元的曲面仿生复眼系统全视场可达 53.9° 、对系统的设计、装调进行了相关分析与研究。

文中研究的仿生复眼光学系统,为了实现体积紧凑化,将相机设计在球型固定体的外凸部分,由此造成的视场拼接模型不同于上述文章中的复眼结构模型。针对这种紧凑的相机固定于球壳外凸部分的结构,文中通过对子眼系统光轴夹角与子眼系统视场角之和的分析,建立了与子眼光轴夹角、子眼系统视场角、观测距离之间的视场重叠量计算模型,实现了子眼间视场拼接重叠率的精确计算。基于该模型,设计

研制了一款 19 孔径的复眼系统,根据采集的相关数据,对比子眼的实际重叠量与理论重叠量,结果表明二者基本一致,验证了视场重叠计算模型的可行性。

基于相机外凸安装结构的视场重叠计算模型的研究,扩大子眼系统视场、减少子眼系统数目,对复眼系统轻量化、小型化具有一定的促进意义。

1 复眼系统视场重叠率理论

在复眼系统中存在较多的子眼系统,视场重叠问题相对复杂,视场重叠与子眼系统的视场角和光轴夹角、观测距离相关。在不同的观测距离下,子眼系统的光轴夹角与视场角之间的关系将会导致视场重叠出现以下情况:(1)当光轴夹角不小于系统视场角之和时,复眼系统将会在观测区域内出现由盲区到重叠区域再到盲区的现象;(2)当光轴夹角小于系统光轴夹角之和时,复眼系统将出现由盲区到过重叠区域及工作区域现象。

1.1 子眼间的光轴夹角与视场角的关系

1.1.1 光轴夹角大于视场角之和

当光轴夹角大于视场角之和时,系统视场重叠情况如图 1 所示。 B 、 Q 两点将整个观测区域分为盲区和重叠区域。其中, AB 、 AQ 分别为 B 、 Q 点在系统 1 光轴上的投影点距系统 1 中心的距离, AB 、 AQ 表达式如下:

$$AB = \left(R - \frac{R \sin \omega_2}{\sin(\theta + \omega_2)} \right) \left(\frac{\sin(\omega_2 + \theta)}{\sin(\omega_1 + \omega_2 + \theta)} \right) \quad (1)$$

$$AQ = \left(R + \frac{R \sin \omega_2}{\sin(\theta - \omega_2)} \right) \left(\frac{\sin(\theta - \omega_2)}{\sin(\theta - \omega_2 - \omega_1)} \right) \quad (2)$$

式中: θ 为子眼间光轴夹角; R 为球型固定体半径; ω_1 为子眼系统 1 的半视场角; ω_2 为子眼系统 2 的半视场角。

图 1 表明,当光轴夹角大于系统视场角之和时,复眼系统的观测距离小于 AB 或大于 AQ 的时系统存

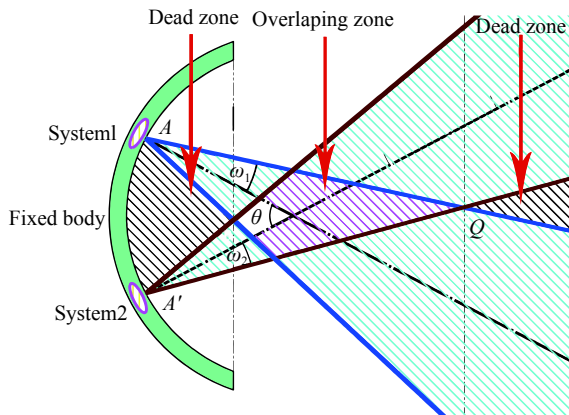


图 1 $\theta > (\omega_1 + \omega_2)$ 时系统示意图

Fig.1 System schematic diagram of $\theta > (\omega_1 + \omega_2)$

在视场盲区, 仅当观测区域处于 BQ 的区间内存在视场重叠, 表明此种情况下系统的重叠区域仅在有限的区域内, 不能满足复眼系统大视距的工作要求。

1.1.2 光轴夹角小于系统视场角之和

当光轴夹角小于系统视场角之和时, 系统场重叠情况如图 2 所示, B 、 E 两点将整个观测区域分为盲区、过重叠区域 (该区域内视场重叠率在短距离内由零增加到 1)、工作区域三个区域, 盲区的划分同光轴夹角大于视场角之和时的情况相同, AE 为节点 E 在系统 1 光轴上的投影点距系统 1 中心的距离, 如公式 (3) 所示:

$$AE = \frac{2R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\omega_2 - \frac{\theta}{2}\right)}{\sin(\theta + \omega_1 - \omega_2)} \quad (3)$$

由公式 (3) 分析可知, 当子眼见光轴夹角、子眼系统视场角固定时, 过重叠区域随球型固定本体半径 R 的增大而增大, 且与 R 为同一数量级。

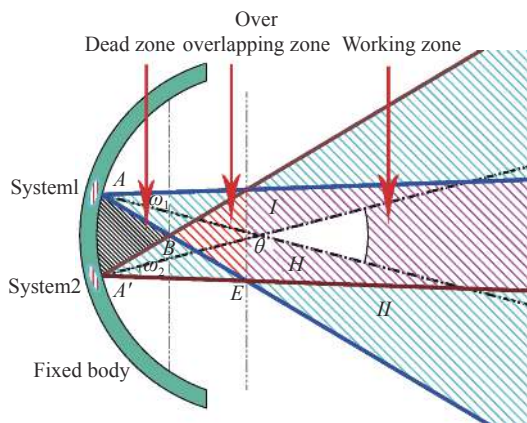


图 2 $\theta \leq (\omega_1 + \omega_2)$ 时系统示意图

Fig.2 System schematic diagram of $\theta \leq (\omega_1 + \omega_2)$

1.1.3 光轴夹角等于视场角之和

当子眼间的光轴夹角等于子眼系统的视场角之和时, 由图 2 中的几何关系可知子眼系统的视场边缘线 I 、 II 为平行关系, 即子眼间视场的重叠区域为定量, 随着观测距离的变化, 子眼视场增大, 即子眼间的重叠率趋向于零。当子眼间光轴夹角小于视场角之和时, 视场边缘线 I 、 II 将会存在一定的角度, 从而保证在长工作距离下子眼间的视场重叠率趋向不为零的定值。

上述分析表明, 为保证系统具有较短的过重叠区域, 从而使系统在较长工作距离内具有重叠区域且不趋向于零, 子眼间的光轴夹角应当小于视场角之和。

1.2 视场重叠率计算数学模型

为保证复眼系统在长工作距离下无盲区, 经 1.1 节的分析可知, 此时应当满足光轴夹角小于系统视场角之和。依据此种情况建立视场重叠计算模型, 此时建立以系统 1 的中心为作标原点的坐标系 XAY , 以系统 2 的中心为坐标原点的坐标系 $X'A'Y'$, 其中 Y 、 Y' 分别为系统 1、系统 2 的光轴, X 、 X' 分别为系统 1、2 所在位置处球型固定体的切线, 其中 O 点为球型固定体的球心, 如图 3 所示。当观测点 M 处于 XAY 坐标系中的坐标为 $(0, L)$ 时, 即观测距离为 L 时, 子眼系统

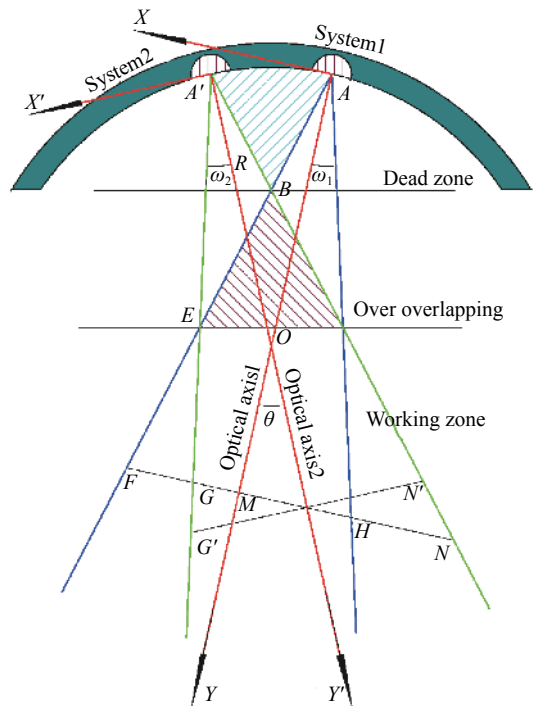


图 3 视场重叠计算原理图

Fig.3 Schematic diagram of field overlap calculation

1 的视场为 F, H 点的 X 坐标所形成的区域, F, H 点在 XAY 坐标系中的 X 坐标分别为:

$$F_x = L \tan \omega_1 \quad (4)$$

$$H_x = -L \tan \omega_1 \quad (5)$$

此时子眼系统 2 在观测点 M 所形成的系统视场为 G, N 点的 X 坐标所形成的区域, 通过构建辅助点 $G'N'$, 求出 G, N 点在 $X'A'Y'$ 的坐标, 利用坐标 $X'A'Y'$ 与坐标 XAY 的转换关系求得 G, N 点的 X 坐标。

首先 $G'N'$ 在 $X'A'Y'$ 的坐标如下:

$$\begin{cases} G'_{x'} = \left(\frac{L-R}{\cos \theta} + R \right) \tan \omega_2 \\ G'_{y'} = \frac{L-R}{\cos \theta} + R \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} N'_{x'} = -\left(\frac{L-R}{\cos \theta} + R \right) \tan \omega_2 \\ N'_{y'} = \frac{L-R}{\cos \theta} + R \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} N_x = \frac{(R-L-R \cos \theta) \sin \omega_2 \tan \omega_2}{\cos(\theta + \omega_2)} - \left[\frac{L-R+R \cos \theta}{\cos \theta} + \frac{(R-L-R \cos \theta) \sin \omega_2 \tan \omega_2 \tan \theta}{\cos(\omega_2 + \theta) \cos \theta} \right] \sin \theta + R \sin \theta \\ G_x = \frac{(L-R+R \cos \theta) \sin \omega_2 \tan \omega_2}{\cos(\omega_2 - \theta)} - \left[\frac{L-R+R \cos \theta}{\cos \theta} - \frac{(L-R+R \cos \theta) \sin \omega_2 \tan \omega_2 \tan \theta}{\cos \theta \cos(\omega_2 - \theta)} \right] \sin \theta + R \sin \theta \end{cases} \quad (11)$$

同时为保证各个系统之间不存在盲区且同时避免出现重叠区域, 由图 3 可知, 子眼系统的视场节点应当满足:

$$F_x > G_x > H_x > N_x \quad (12)$$

若给定两个光学系统的视场角之后, 为保证两个系统之间不存在盲区, 同时避免重叠现象的出现, 利用公式 (5), (6), (11) 求得光轴夹角应当满足以下条件:

$$|\omega_2 - \omega_1| < \theta < (\omega_1 + \omega_2) \quad (13)$$

在满足系统之间不存在盲区的条件下, 则视场重叠定量计算如公式 (14) 所示:

$$\varphi(L, \theta, R, \omega_1, \omega_2) = \frac{|H_x - G_x|}{2L \tan \omega_1} \quad (14)$$

由于复眼系统的工作距离远远大于球型固定体的半径, 根据公式 (11) 给出了 G 点 X 坐标随球型固定体半径的变化图像, 如图 (4) 所示, 可以看出当球型固定体半径由 100 mm 变化到 1000 mm 时 G 点的 X 坐标近似为定值, 球型固定体的半径对 G 点坐标的

通过 $G'N'$ 与 G, N 之间的关系求得 $X'A'Y'$ 在 $X'A'Y'$

坐标系中的坐标如下:

$$\begin{cases} G_{x'} = \frac{G'_{x'} \sin \omega_2}{\cos(\omega_2 - \theta)} \\ N_{x'} = \frac{N'_{x'} \sin \omega_2}{\cos(\theta + \omega_2)} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} G_{y'} = G'_{y'} - G'_{x'} \tan \theta \\ N'_{y'} = N'_{y'} + N'_{x'} \tan \theta \end{cases} \quad (9)$$

其中坐标 $X'A'Y'$ 与坐标 XAY 的转换关系如下:

$$\begin{cases} X' \cos \theta - Y' \sin \theta + R \sin \theta = X \\ X' \sin \theta + Y' \cos \theta - R \cos \theta + R = Y \end{cases} \quad (10)$$

利用公式 (6), (7), (9), (10) 求出 G, N 两点在 XAY 坐标系中的 X 坐标分别为:

影响可以忽略不计, 因此简化的 G 点的 X 坐标如公式 (15) 所示:

$$G_x = \frac{L \sin \omega_2 \tan \omega_2}{\cos(\omega_2 - \theta)} - \frac{L \sin \theta}{\cos \theta} + \frac{L \sin \omega_2 \tan \omega_2 \tan \theta \sin \theta}{\cos \theta \cos(\omega_2 - \theta)} \quad (15)$$

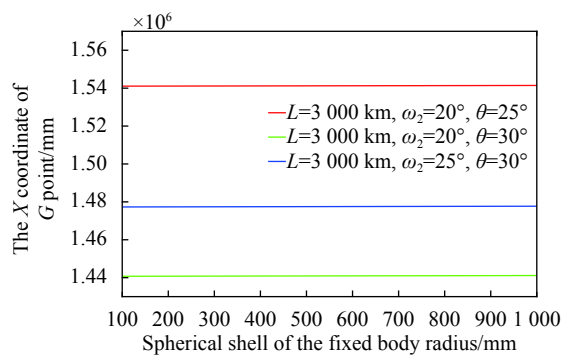


图 4 G 点 X 坐标随球型固定体半径 R 变化图像

Fig.4 Image of the X coordinate of G point with the R

进一步得到简化后视场重叠率定量计算公式如公式 (16) 所示:

$$\varphi(L, \omega_2, \omega_1, \theta) = \frac{|1 - L(\sin \omega_2 \tan \omega_2 \cos \theta - \sin \theta \cos(\omega_2 - \theta) + \sin \omega_2 \tan \omega_2 \tan \theta \sin \theta)|}{2L \tan \omega_1 \cos(\omega_2 - \theta) \cos \theta} \quad (16)$$

由公式 (16) 得出不同参数下复眼系统在工作区域内视场重叠率随观测距离变化图像如图 (5) 所示。

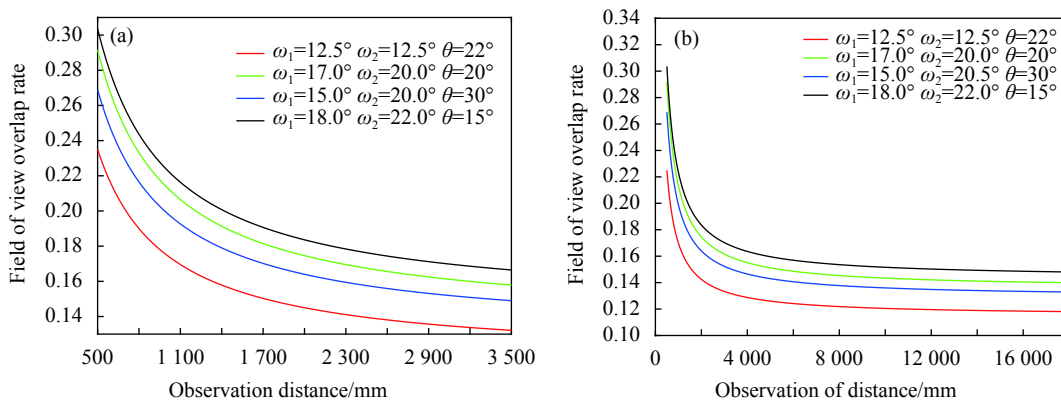


图 5 视场重叠率随观测距离变化图像

Fig.5 Image of field of view overlap rate changing with observation distance

图 5(a) 表明在观测距离由 500 mm 增大至 3500 mm 时, 不同参数下的系统视场重叠率急剧减小, 图 5(b) 表明当观测距离由 10000 mm 增大至 18000 mm 时, 视场重叠率趋于定值。

综上所述, 复眼系统设计时为避免出现视场盲区, 两子眼之间的光轴夹角应当小于两子眼之间的视场角之和; 此时基于子眼光轴夹角、子眼系统视场角、观测距离之间的关系, 构建了子眼间视场重叠量数学模型, 利用公式 (16) 可实现子眼间视场重叠量的精确计算, 通过对该数学模型分析, 为避免子眼系统间出现过重叠区域及盲区子眼间的光轴夹角应当满足公式 (13); 复眼系统在视场重叠区域内视场重叠量将会随着观测距离的变化逐渐出现定值, 且不为零。

2 复眼系统设计

文中设计了一款总视场 79.23°、子眼阵列数为 2 个阵列、子眼数目为 19 个、中心子眼系统对 5 km 外的目标进行精准识别; 边缘子眼系统完成 3 km 外目标的捕捉功能。综合考虑确定子眼系统光学参数如表 1 所示, 并对子眼系统镜头进行了设计。该系统中镜头与传感器一一对应, 通过球面将各个子眼进行固定, 其中子眼系统的物方视场指向球心, 探测系统

表 1 子眼光学参数

	Center system	Edge system
Focal/mm	54.8	19.12
$\omega_x \times \omega_y$	4.4°×3.7°	12.5°×10.5°

位于球型固定体的外凸部, 在满足系统大视场的条件下, 缩小系统的体积, 为探测系统的装调留足空间。

建立 XYZ 坐标系, 以子眼 A、B1、C1 的中心连线为 X 轴, 子眼 A、C10 的中心连线为 Y 轴, Z 轴为中心子眼 A 的光轴, 如图 6 所示。在满足系统视场的前提下, 尽可能的减少子眼数目、缩小系统体积, 选择在观测距离 3 km 处, 1 级阵列子眼与中心子眼系统无盲区; 1 级阵列子眼子眼间视场重叠率在 X 方向和 Y 方向分别为 75%, 40%; 1 级阵列子眼与 2 级阵列子眼间视场重叠率在 X 方向和 Y 方向分别为 40%, 20%; 1 级阵列子眼与 2 级阵列子眼只在 X 方向存在视场重叠的重叠率为 15%; 2 级阵列子眼间视场重叠率在 X 方向和 Y 方向分别为 70%, 30%。

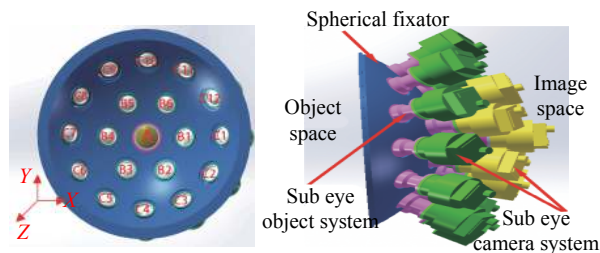


图 6 复眼系统结构图

Fig.6 Diagram compound eye system

利用视场重叠率的数学模型, 结合公式 (16), 求得各个子眼间光轴夹角 θ 、 θ_x 、 θ_y 如图 2 所示, 其中 θ 、 θ_x 、 θ_y 分别为子眼间光轴夹角、子眼光轴在 XZ、YZ 平面中投影后与 Z 轴的夹角。采用圆周阵列形式进行排布, 确定第一阵列子眼数目为 6 个, 第二阵列子眼数目为 12 个, 从而得到复眼系统整体结构。

表 2 子眼间光轴夹角

Tab.2 Angle of optical axis of subsystem

	(A, B1)	(B1, C1)	(C1, C2)	(B1, B2)
θ	14.30°	21.60°	17.47°	14.19°
θ_x	14.30°	21.60°	10.30°	7.04°
θ_y	0°	0°	15.84°	12.35°

3 系统成像实验及结果分析

3.1 成像实验

为验证上述重叠理论的正确性,利用上述设计的复眼系统选取视场范围内物距最远处为 5 km 场景搭建实验平台。

在子眼相机图像采集之前,首先采用莱卡 5100 经纬仪的十字光源准直特性对水平方向中心、边缘光学系统进行对准,根据经纬仪水平方向转角确定两系统光轴夹角;其次将各个子眼的图像采集系统通过数据输出端同计算机相连,对各个子眼进行调焦,获得清晰的图像;然后利用对相机进行装调校准,从而使各子眼物方视场分配水平线、竖直线的平行性;最后,各个子眼调整完成之后,并在同一时间捕获各个子眼系统的图像,随后进行图像拼接处理。

图 7(a) 为一级阵列子眼 B4、B5 拼接后的图像;图 7(b) 为二级阵列间子眼 C1、C12 拼处后的图像;图 7(c) 1 级阵列与 2 级阵列在 X、Y 方向存在视场重叠的子眼 B4、C8 拼接后的图像;图 7(d) 为一级、二级阵列只在 X 方向存在视场重叠的子眼 B1、C1 拼接后的图像。

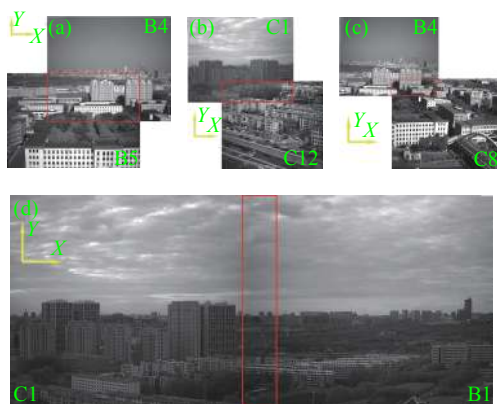


图 7 不同阵列间子眼拼接图像

Fig.7 Sub-eye stitching between different arrays

实验测量,各子眼所成图像大小在 X×Y 方向均为 2448×2048 pixel,图 7 中红色区域为子眼间得重叠区域。图 7(a) 中一级阵列子眼间的视场重叠区域为 1742×942 pixel;图 7(b) 中在 X、Y 方向存在视场重叠的一级、二级阵列子眼间的重叠区域为 1053×376 pixel;图 7(c) 中二级阵列间两子眼的重叠区域为 1630×504 pixel;图 7(d) 中一级、二级阵列间子眼只在 X 方向存在视场重叠的重叠区域在 X 方向为 358 pixel。

图 8 为全部子眼拼接裁剪的全景图像,其中红色矩形框区域内为中心子眼系统的视场范围。经实验测量该系统中心视场为 8.8°×7.4°,全域视场为 79.23°且无盲区。

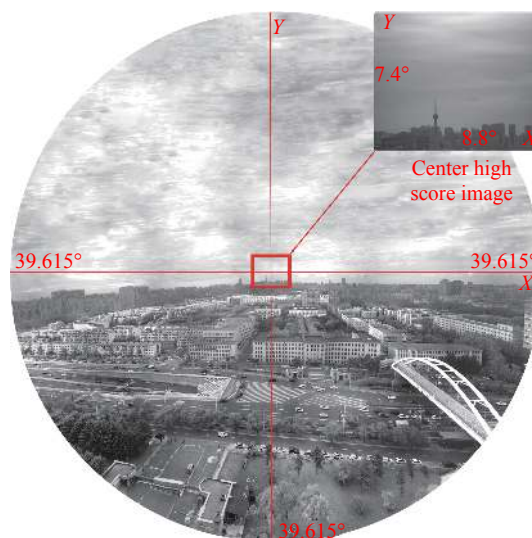


图 8 全部子眼拼接处理后的全景图像

Fig.8 Panoramic image after all sub-eyes are stitched together

图 9(a)、(b) 分别为中心子眼系统、边缘阵列子眼系统视场区域内的目标图像,图像中的目标距观测点距离分别为 5 km 和 3 km。根据图 1 显示,中心、边



(a) 中心子眼局部图像 (b) 边缘子眼局部图像
(a) The location image of center (b) The location image of edge

图 9 局部目标图像

Fig.9 The local image of target

缘子眼系统均能识别相应距离下的楼层轮廓, 楼层轮廓线宽一般均小于 5 m, 系统具有较好的成像质量。

3.2 结果分析

实验测量得到一级阵列间子眼在 X、Y 方向的视场重叠率分别为 71.16%、45.99%; 一级与二级阵列间

子眼在 X、Y 方向同时存在重叠的视场重叠率分别为 43.00%、18.36%, 只在 X 方向存在重叠的视场重叠率为 14.62%; 二级阵列间子眼在 X、Y 方向的视场重叠率分别为 66.58%、24.6%, 上述子眼间的实际重叠率与理论重叠率的对比分别如图 10(a)~(d) 所示。

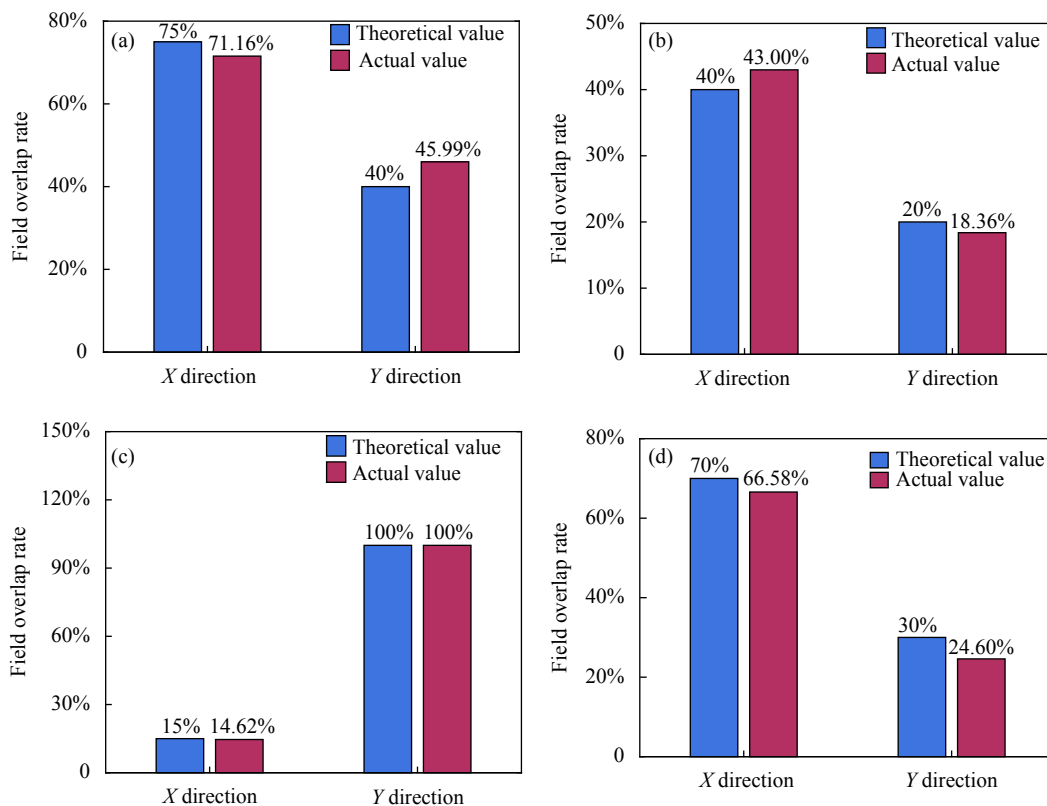


图 10 实际重叠率与理论重叠率对比图

Fig.10 Comparison chart of actual overlap rate and theoretical overlap rate

由图 10 得出, 当子眼间的光轴夹角实际值相对理论值发生变化时, 将导致子眼实际重叠率在 X、Y 方向发生变化。根据经纬仪装调理论分析计算得到中心子眼系统和边缘子眼系统光轴的装调精度约为 0.15°。综合系统装调误差, 视场实际重叠量与理论重叠量基本一致。

4 结 论

文中通过对子眼系统视场角与子眼间光轴夹角之间的关系讨论, 提出了视场重叠量计算数学模型; 依据该模型设计了一款用目标捕捉、识别的复眼系统, 该系统克服了微透镜阵列系统视距小及传统相机阵列式复眼系统视场利用率低的特点, 提高了复眼系统对目标方位信息的获取能力。并对系统子眼间

的视场重叠率进行了实验验证, 实验结果表明, 复眼系统实现了 79.23° 圆域视场内的广域监控, 各子眼模块成像质量优良; 各级阵列子眼间的实际重叠率与理论重叠率基本一致。文中提出的视场重叠量计算模型对后续仿生复眼系统的应用具有一定的促进意义。

参考文献:

- [1] Hu Xuelei, Gao Ming, Chen Yang. Design of curved bionic compound eye optical system with larged field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0114002. (in Chinese)
- [2] Zhang Jiaming, Chen Yu, Tan Haiqi. Optical system of bionic compound eye with large field of view [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1012-1020. (in Chinese)
- [3] Qiu Su, Ni Yu, Jin Weiqi, et al. FOV modeling of multi-aperture

- superposition compound eye based on micro-surface fiber faceplate [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3018-3025. (in Chinese)
- [4] Zhang Guang, Wang Xinhua, Li Dayu. Alignment error detection method of sub-eye mounting hole for bionic compound eye system [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 881-888. (in Chinese)
- [5] Zhou Tianfeng, Xie Jiaqing, Liang Zhiqiang, et al. Advances and prospect of molding for optical microlens array [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 603-618. (in Chinese)
- [6] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, et al. Multiscale gigapixel photography [J]. *Nature*, 2012, 486(7403): 386-389.
- [7] Pang Kuo, Fang Fengzhou, Song Le, et al. Bionic compound eye for 3D motion detection using an optical freeform surface [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(5): B28-B35.
- [8] Pang Kuo, Song Le, Fang Fengzhou. Large field of view curved compound eye imaging system using optical freeform surface [J]. *Journal Optoelectronic Laser*, 2018, 29(1): 8-13. (in Chinese)
- [9] Yan Fei, Guo Yunzhi, Shi Lifang. Reserch of image mosaic algorithm based on bionic compound eye system [J]. *Aero Weaponry*, 2017(6): 49-53. (in Chinese)
- [10] Cao Jie, Cui Huan, Meng Lingtong, et al. Multi-resolution imaging with camera arrays on curved surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4): 0411003. (in Chinese)
- [11] Gao Tianyuan, Dong Zhengchao, Zhao Yu, et al. Structure and alignment of field stitching compound eye optical imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 1122001. (in Chinese)
- [12] Fu Yuegang, Zhao Yu, Liu Zhiying, et al. Design of the bionic compound eye optical system based on field splicing method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(2): 422-429. (in Chinese)
- [13] Fu Yuegang, Zhao Yu, Liu Zhiying, et al. Design of compact bionic compound eye optical system used for target identification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0602001. (in Chinese)
- [14] Tian Yuqi, Gao Tianyuan, Zhao Yu, et al. Angle error of bionic compound eye imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0310001. (in Chinese)