

复眼系统的大视场平像面拼接方法

于金池, 胡源*, 程彬鹏, 张磊

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 传统曲面仿生复眼中继系统需要承担大视场子眼拼接造成的弯曲像面转换成平像场的任务, 给系统设计带来一定难度。针对上述问题提出一种大视场复眼平像面拼接排列的方法, 并对该方法进行数学描述。通过构建子眼个数、系统总视场角以及后续合理选取光中继系统参数之间的平衡模型, 重点分析中继系统景深与复眼拼接像面光程差之间的关系, 得出复眼平像面的拼接方式产生的光程差在典型光中继系统的可接受景深范围内, 可以有效地降低中继光学系统设计压力的结论。并基于上述理论设计一种单子眼的视场为 16° 、整体视场为 96° 的复眼光学系统进行实践验证。系统最终实现畸变小于 2%, 传递函数在中心视场达到衍射极限, 边缘视场接近衍射极限的良好像质, 证明了该拼接理论可行。

关键词: 光学系统设计; 仿生复眼系统; 平像面拼接; 曲面拼接

中图分类号: Q692; TH702 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210848

Large field of view flat image plane splicing method for compound eye systems

Yu Jinchi, Hu Yuan*, Cheng Binpeng, Zhang Lei

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

Abstract: The conventional curved bionic compound eye relay system is required to undertake the task of converting the curved image plane caused by the splicing of large-field subeyes into a flat image field, which poses certain difficulties to the system design. A method was proposed for the splicing arrangement of the flat image plane of the large-field compound eyes, and the method was described mathematically. By constructing a balanced model between the number of subeyes, the total field of view of the system and the subsequent reasonable selection of the optical relay system parameters, the relationship between the depth of field of the relay system and the optical range difference of the spliced image plane of the compound eye was analysed, and it was concluded that the optical range difference generated by the splicing method of the compound eye flat image plane was within the acceptable depth of field of a typical optical relay system, which could effectively reduce the design pressure of the relay optical system. Based on the above theory, a compound eye optical system with a field of view of 16° for a single subeye and an overall field of view of 96° was designed for practical verification. The system finally achieves an aberration of less than 2%, the transfer function reaches the diffraction limit in the central field of view and the edge field of view is close to the diffraction limit with good image quality, which proves that splicing theory is feasible.

收稿日期: 2021-11-12; 修订日期: 2021-12-21

基金项目: 吉林省科技发展计划 (20190302098 G)

作者简介: 于金池, 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。

导师(通讯作者)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。

Key words: optical systems design; bionic compound eye system; flat plane splicing; curved plane splicing

0 引言

苍蝇、昆虫等动物的复眼以其广阔的视场,对高速运动的物体有出色的灵敏度以及紧凑的光学结构而著名。仿生复眼系统模拟生物复眼可以提供紧凑的光学结构,同时具有许多优点,如视场大、空间分辨率高、对高速运动的物体较灵敏、能够检测偏振信息等^[1-2],在医疗、军事、工业等领域中广泛应用^[3],因此受到学者们广泛关注,进行了大量的研究。例如:张远杰等^[4]设计的曲面仿生复眼测速系统,由曲面仿生复眼辅以光学中继系统,系统视场达到 98°;张家铭^[5]等设计的曲面仿生复眼系统;许黄蓉^[6-7]等设计了 120°的大视场成像的复眼系统;史成勇^[8-9]等设计的圆形复眼阵列,通过中继系统拉平像场,系统视场达到 122.4°;于晓丹^[10-11]等设计的曲面复眼透镜阵列配合滤光片及光中继转向系统,该系统视场达到 138°。上述传统曲面仿生复眼配合中继系统的一次像面为弯曲像场,中继系统承担大视场的弯曲物面转化成平像场的任务,设计难度较大。此外,还有光学结构是不通过光学中继系统,直接采用不同焦距的复眼成像在平面探测器上。例如:程阳^[12]等通过在曲面基底上排布多焦距的子眼,实现 105°视场角的复眼系统;邸思^[13]等提出了一种非均一曲面复眼透镜结构,在曲面基底不同环形阵列上排布不同焦距子眼透镜,最终成像在平面 CMOS 上。这种结构的优点是结构简单,但是存在分辨率低、边缘视场容易出现离焦等问题。

文中为了解决传统曲面复眼中继系统承担大视场平像场任务、设计难度大的问题,提出了一种大视场复眼平像面拼接光学结构。通过构建子眼个数、系统总视场角以及合理选取光中继系统相关参数之间的平衡模型,利用子眼的空间排布,使得在实现大视场的同时复眼子眼的像面中心在同一平面上,拼接后的系统像面对于光学中继系统来说,虽然为非连续且有一定光程差的平面波前,但是和通常情况下采用高分辨率探测器的中继系统景深相比可以忽略不计,能有效降低传统曲面复眼中继系统需要承担平像场的设计难度,证明了该拼接方法理论可行,并基于该方法设计了一种复眼成像光学系统,进行了实践验

证,最终实现了小光学代价下的大视场复眼光学系统的高质量成像。

1 大视场平像面拼接波前分析

上述传统曲面仿生复眼系统、多焦距复眼系统和平像面拼接复眼系统的结构对比如图 1 所示。对比图 1(a)、(c)可以看出相比传统曲面复眼,平像面拼接

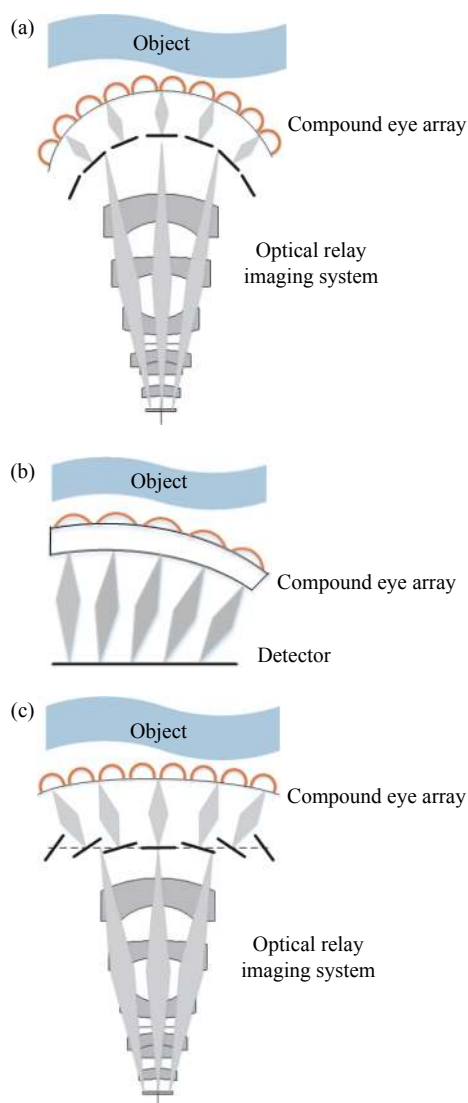


图 1 仿生复眼结构对比图。(a) 传统曲面复眼;(b) 多焦距曲面复眼;(c) 平像面拼接复眼

Fig.1 Comparison of bionic compound eye. (a) Traditional curved compound eye; (b) Multifocal curved compound eye; (c) Flat-plane splicing compound eye

方法在中继之前将曲面像变换为相对平面像。

大视场平像面拼接采用复眼系统中各子眼一次像面中心点排列在同一平面上的方法,将一次弯曲像面转换为相对平面,以降低传统曲面复眼中继系统承担平像场的设计难度。但此种方式会造成波面不连续且相对平面波引入光差,平像面拼接模型如图 2 所示。

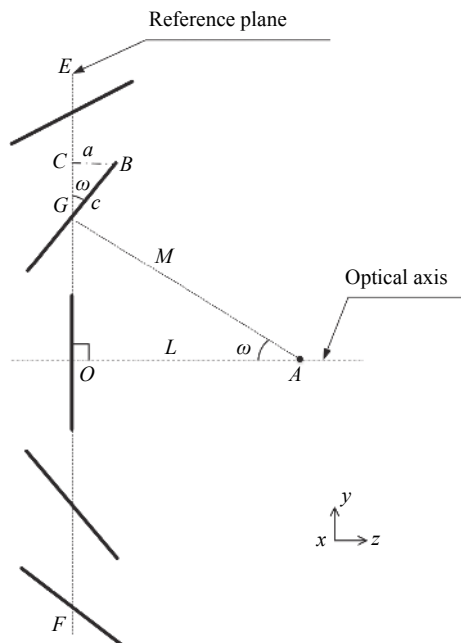


图 2 平像面拼接

Fig.2 Flat-plane splicing

在图 2 中, A 点为系统主光轴上复眼视场拼接围绕其旋转的点。设中央子眼像面所在平面 EF 为参考面, O 点为参考面 EF 与系统主光轴的交点, B 点为某级子眼一次像面边缘位置,从 B 点向相对平面参考面 EF 作垂线,交参考面 EF 于 C 点,即 BC 垂直于 EF 平面, G 点为该级子眼的一次像面与参考面 EF 的交点。设 $BC=a$ 、 $BG=c$, OA 的距离为 L , GA 的距离为 M ,该级子眼光轴与中继系统光轴的夹角为 ω ,在 $\triangle OGA$ 中有:

$$\cos \omega = \frac{L}{M} \quad (1)$$

利用公式 (1) 使复眼各子眼一次像面中心点排列在同一平面上。复眼系统的总视场角可以表示为:

$$\theta = n\beta + 2\alpha \quad (2)$$

式中: θ 为总视场; n 为 Y 方向排布复眼个数; β 为相邻子眼光轴夹角,同时有 $\omega = n\beta$; 2α 为单眼视场角。在无视场重叠^[14]和间隙的情况下, $\omega=2n\alpha$ 。将公

式 (2) 进一步推导有:

$$\theta = 2\alpha(n+1) \quad (3)$$

如图 2 中可以明显看出,平像面拼接排列后的像面不是一个理想的平像面,会产生波面的不连续,轴外视场的各级子眼像面与理想波面之间引入一定的光程差。在 $\triangle BCG$ 中, a 、 c 、 ω 之间满足正弦关系:

$$\sin \omega = \frac{a}{c} \quad (4)$$

式中: c 同时为单眼视场; a 同时为该级子眼像面相对理想平面波造成的光程差,即平像面拼接引入的光程差 D_{OP} , 可以表示为:

$$D_{OP} = c \sin \omega = c \sin \left(\frac{\theta n}{n+1} \right) \quad (5)$$

根据公式 (5), 对一定系统总视场 θ 下, 不同子眼个数 n 和平像面光程差 D_{OP} 之间的关系进行仿真。设定系统总视场角为 96° , 分别对子眼数 13、11、9 的像面光程差进行计算, 结果如图 3 所示。其中横坐标 ω 表示各子眼与中继系统光轴的夹角, 纵坐标表示相对理想平面波的光程差。子眼个数 13、11、9 分别对应光轴夹角为 6.6° 、 8° 、 10° 。

图 3(a)~(c) 分别表示在系统总视场 96° 的情况下, 子眼数量为 13、11、9 时光程差与各子眼和中继系统光轴的夹角之间的关系。因为复眼系统的各级子眼是关于中继系统光轴上下对称排布的, 所以光程差的大小关于光中继系统光轴呈对称分布。从图 3 可以看出, 平像面拼接排列后的像面光程差曲线表现为不连续折线状, 随着 ω 的增大而增大, 最边缘子眼的光程差为最大。随着子眼个数的减少, 为了保证总视场的无缝拼接, 单个子眼视场增大, 子眼间光轴夹角增大, 最大的光程差却在减少。子眼个数为 13 时最大光程差为 0.286, 11 时最大光程差为 0.281, 9 时最大光程差为 0.275。也就是说, 在这种拼接模式下, 更少的子眼数量可以获得更小的光程差, 但是单个子眼也会因为视场过大产生设计压力, 需要进行平衡设计。

转换像面所产生的光程差对后续中继系统造成影响, 可以用景深进行评判。以衍射极限下的图像探测器像元尺寸 p 作为分辨极限的焦深范围对应应在物面处的景深 M , 表达为^[15]:

$$M = \frac{pFu^2}{f^2 - pFu} = \frac{pu^2}{fD - pu} \quad (6)$$

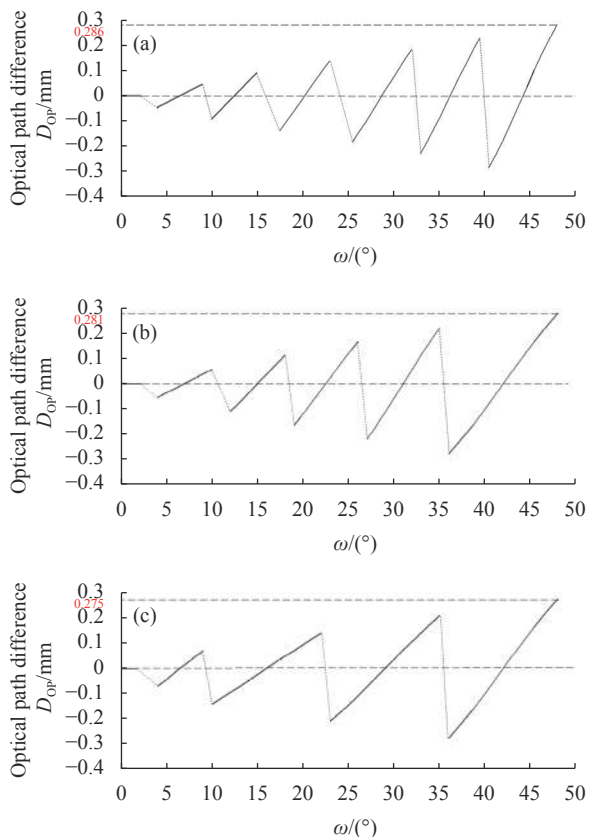


图 3 不同子眼数量下光程差曲线。(a) 13; (b) 11; (c) 9

Fig.3 Optical path difference under different number of eyes. (a) 13; (b) 11; (c) 9

式中: F 为中继系统焦距与通光口径的比值; f 为中继焦距; u 为中继物距; D 为中继系统口径大小。

当最大的光程差满足 $D_{OP} \leq$ 景深 M 时, 此时满足成清晰像的条件, 可以忽略误差认为平像面拼接得到的是理想平面, 可以有效地降低光中继设计难度, 证明该拼接方法理论可行。由公式 (5)、(6) 可以得到公式 (7):

$$D_{OP} = c \sin\left(\frac{\theta n}{n+1}\right) \leq \frac{pu^2}{fD - pu} \quad (7)$$

通过公式 (7), 可以在该条件下合理构建子眼个数 n 、总视场 θ 、中继系统参数三者之间的平衡模型。对公式 (7) 进行仿真, 结果如图 4、图 5 所示。图 4(a) 给出 $c=0.4$ mm、子眼个数 n 分别为 13、11、9 时不同总视场 θ 下对应的最大光程差, 可以看出当子眼个数一定时, 光程差随着 θ 的增大而增大。图 4(b) 给出当探测器像元大小 $p=5$ μ m, 物距 $u=30$ mm, 焦距 f 为 5 mm、10 mm 和 15 mm 时不同口径 D 对应下的景深, 可以看出在一定中继系统参数范围内景深的变化。对比

图 4(a)、(b) 的曲线对应的纵坐标值, 将选定子眼个数在不同总视场 θ 下的光程差与选定中继系统参数 f 、 D 下的景深值进行对比, 当光程差小于中继景深时满足成清晰像的条件。

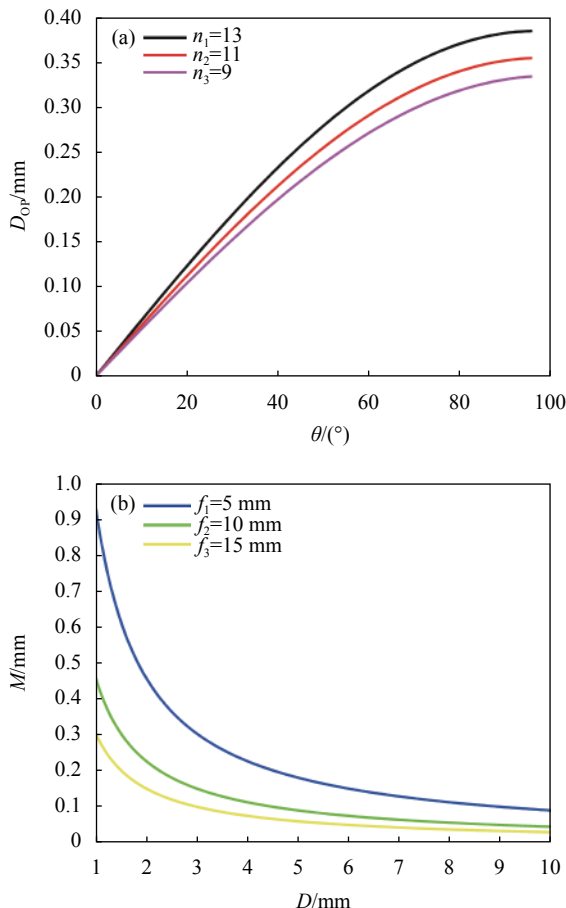


图 4 不同参数下的最大光程差、景深曲线。(a) 不同 n 、 θ 对应的最大光程差; (b) 不同 f 、 D 下的景深

Fig.4 Maximum optical path difference, depth of field curve at different parameters. (a) Maximum optical path difference for different n , θ ; (b) Depth of field at different f , D

公式 (7) 中当最大光程差 D_{OP} =景深 M 时, 可以得到如下仿真结果。

图 5 中横坐标表示总视场, 纵坐标表示中继系统口径 D , 当 f 和 n 选定时, D 随着总视场的增大而增大。通过公式 (7) 合理排布子眼的位置及个数后, 可以进一步指导中继系统的参数设计, 帮助系统总体设计在经济成本和光学指标中做出平衡选取。取常用探测器像元大小 $p=5$ μ m 为例, 通过公式 (6) 计算出参数为焦距 $f=5$ mm、 $D=3$ mm、 $u=30$ mm 的典型中继系统景深为 546λ , 当光程差小于该中继系统景深便可以

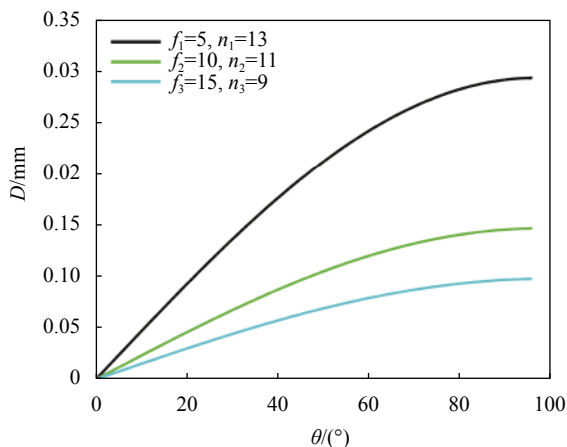


图 5 不同 f, n, θ 下对应的中继口径 D

Fig.5 The corresponding relay D under different f, n, θ

忽略误差,认为平物面拼接后得到的是理想平面,可以有效地降低光中继设计难度。基于该方法设计一种大视场复眼光学系统,进行实践验证。

2 复眼系统设计及像质分析

通过平像面拼接排列的方法使各子眼一次像面中心点排列在同一平面上。整体复眼系统由两部分构成:曲面复眼透镜阵列和中继系统。系统的总视场角为 96° ,长度为 84 mm ,系统工作波长为 $0.4\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 。单子眼的视场为 16° ,由两片透镜组成。优化后的光学中继系统由九片透镜组成,焦距为 5 mm ,视场角为 120° 。在进行系统组合设计时要注意光瞳匹配原则,曲面复眼透镜阵列的出瞳位置应是光学中继系统的入瞳位置。组合后系统的像差主要由中继系统决定,系统的光阑位置位于中继系统的中间位置处。最终

系统设计参数如表 1 所示。

系统组合后的总体视场角为 96° ,目标在中心和边缘部分都能清晰成像,并且相关像差得到校正。曲面复眼系统整体布局如图 6 所示。

由于弯曲复眼中所有子眼全部对称排列,仅选取中心子眼和最边缘子眼进行分析。图 7(a)为中心子眼的场曲和畸变图,可以看出场曲小于 0.1 mm ,畸变小于 1% ,满足大部分应用的成像要求。图 7(b)为中心子眼的点列图,可以看出 RMS 值均在艾里斑半径内,说明像质满足一定要求。图 7(c)为中心子眼的 MTF 曲线图,可以看出在 80 lp/mm 的奈奎斯特频率下,MTF 值接近 0.6 ,表明可以获得较好的成像质量。图 7(d)为中心子眼波前图,可以看出波峰到波谷为 0.086λ ,成像质量满足要求。

图 8 为最边缘子眼的模拟结果。图 8(a)为最边缘子眼在 $\omega=40^\circ$ (即子眼透镜偏向光中继系统光轴的

表 1 大视场复眼系统光学参数

Tab.1 Optical parameters of compound eye system with large field of view

Design objective	Standard requirement
Acceptance angle of each ommatidium $2\alpha/(\text{degrees})$	16
Number of ommatidia n	11
Focal length of relay system/mm	5
Diameters of relay system D/mm	3
Total FOV of the system $\theta/(\text{degrees})$	96
Wavelength range $\lambda/\mu\text{m}$	0.4-0.9
Focal length f/mm	0.5

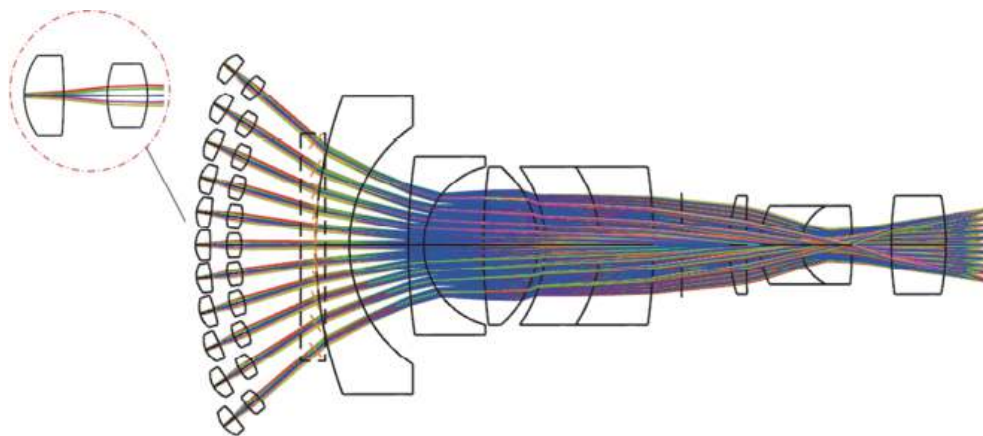


图 6 仿生复眼成像系统的光学布局

Fig.6 Optical layout of the bionic compound eye imaging system

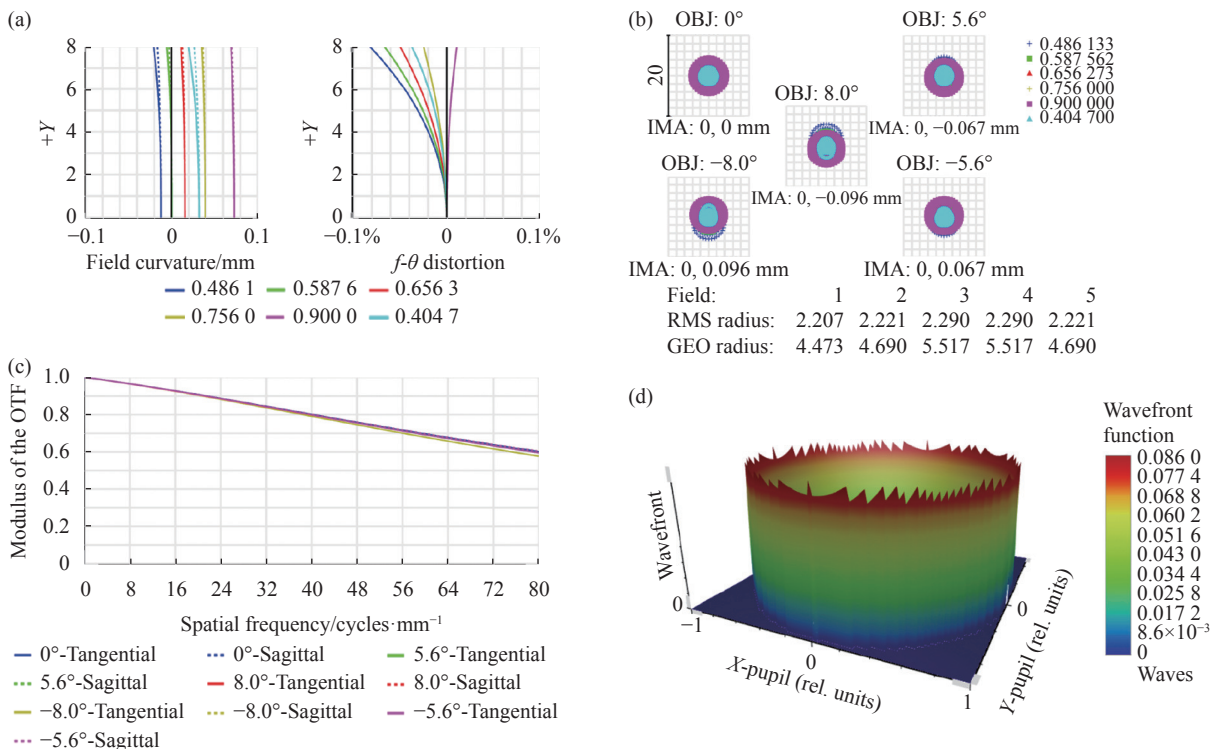


图 7 中心子眼仿真结果。(a) 场曲畸变; (b) 点列图; (c) MTF; (d) 波前

Fig.7 Simulation results for central ommatidium. (a) Field curvature and distortion; (b) Spot diagram; (c) MTF; (d) Wavefront

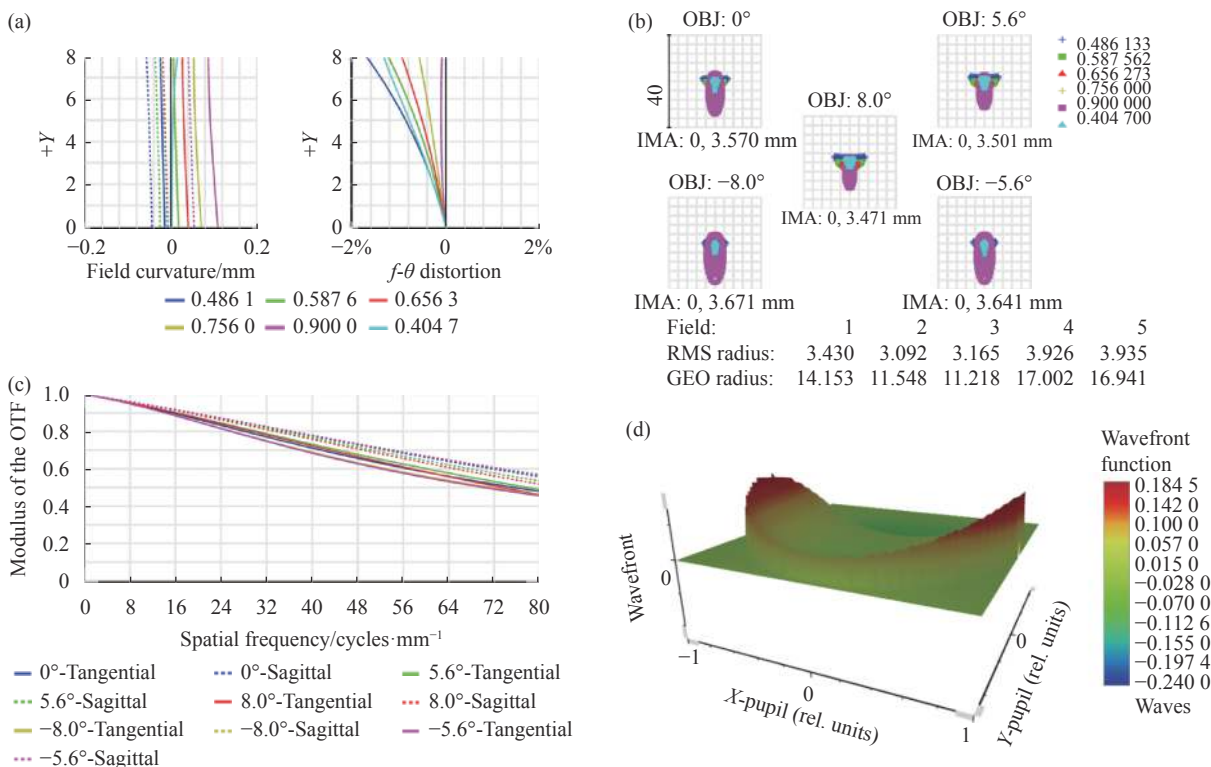


图 8 最边缘子眼仿真结果。(a) 场曲畸变; (b) 点列图; (c) MTF; (d) 波前

Fig.8 Simulation results for the ommatidium at the extreme edge. (a) Curvature distortion; (b) Spot diagram; (c) MTF; (d) Wavefront

夹角为 40°) 的场曲畸变曲线图。可以看出, 最边缘子眼场曲小于 0.2 mm , 畸变控制在 2% 以内。图 8(b) 为最边缘子眼的点列图, 不同视场下的 RMS 值分别为 3.106 、 2.693 、 2.694 、 3.699 、 $3.686\ \mu\text{m}$, 艾里斑半径为 $4.606\ \mu\text{m}$, RMS 值均在艾里斑半径内。最边缘子眼的 MTF 曲线图如图 8(c) 所示, 可以看出在 80 lp/mm 的奈奎斯特频率下, MTF 值高于 0.4 且曲线平滑, 表明在边缘视场也可以获得较好的成像质量。图 8(d) 为最边缘子眼的波前图, 可以看出波峰到波谷为 0.424λ , 说明最边缘子眼产生的最大光程差得到了很好的校正。

3 结 论

针对现有复眼拼接中继系统设计难度大的问题, 提出了一种平像面拼接的方法, 并且对该方法进行了数学描述。通过构建子眼个数、系统总视场角以及后续光中继系统参数选取之间的平衡模型, 分析出该拼接方法造成的光程差通常在中继系统可接受的景深范畴内, 证明可以有效地降低后续光中继系统的设计难度。基于该方法设计的大视场复眼光学系统进行实践验证, 结果证明了该方法理论可行。

参考文献:

- [1] Hu Xuelei, Gao Ming, Chen Yang. Design of curved bionic compound eye optical system with large field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0114002. (in Chinese)
- [2] Krishnasamy R, Wong W, Shen E, et al. High precision target tracking with a compound-eye image sensor [C]//Conference on Electrical & Computer Engineering. IEEE, 2004.
- [3] Xu Yan, Yan Shuhua, Zhou Chunlei, et al. Advances in bionic study on insects' compound eyes [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(S1): 10-12. (in Chinese)
- [4] Xu Huangrong, Liu Jinheng, Zhang Yuanjie, et al. UAV-borne biomimetic curved compound-eye imaging system for velocity measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 232-238. (in Chinese)
- [5] Zhang Jiaming, Chen Yu, Tan Haiqi, et al. Optical system of bionic compound eye with large field of view [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1012-1020. (in Chinese)
- [6] Wang Y, Shi C, Xu H, et al. A compact bionic compound eye camera for imaging in a large field of view [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106705.
- [7] Xu H, Zhang Y, Wu D, et al. Biomimetic curved compound-eye camera with a high resolution for the detection of distant moving objects[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 411492.
- [8] Shi C, Wang Y, Liu C, et al. SCECam: A spherical compound eye camera for fast location and recognition of objects at a large field of view [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32333.
- [9] Shi Chengyong. Research on the design and image process of bioinspired spherical compound eye imaging system[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017. (in Chinese)
- [10] Yu Xiaodan. Design of imaging system for the multispectral compound eye camera with a large-field of view[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [11] Yu Xiaodan, Zhang Yuanjie, Wang Yuanyuan, et al. Optical design of a compound eye camera with a largefield of view for unmanned aerial vehicles [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(7): 0722003. (in Chinese)
- [12] Cheng Y, Cao J, Hao Q, et al. Compound eye and retina-like combination sensor with a large field of view based on a space-variant curved micro lens array [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3502.
- [13] Tao Kekai. Design and integration of the curved multi-focusing compound eye imaging system[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [14] Li Wenxuan, Hu Yuan, Zhang Kai, et al. Field of view overlap rate of bionic compound eye system[J] *Infrared and laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200435. (in Chinese)
- [15] Fang Junbo. Research on Fast auto-focus technology of short focus depth optical camera based on image features [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)