

# 双模式复眼成像系统研究

许 盟, 王彦钦, 王长涛, 李军辉, 罗先刚\*

中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209

**摘要** 复眼成像系统具有视场大、体积小、质量轻等优势,近年来得到国内外的广泛研究,是光学成像技术未来发展的方向之一。受限于较小的子孔径口径,现有大视场复眼系统得分辨率较低,无法满足遥感、航空侦察等领域的需求。针对上述问题提出了双模式复眼成像系统,该系统不仅具备传统复眼的多孔径和大视场成像能力,同时可将所有子孔径指向同一视场,对采集的多幅子图像进行高分辨重建,大幅提升了成像分辨率。对该系统的原理和实现方法进行分析,通过搭建实验装置验证了双模式成像的可行性,为复眼成像系统发展提供了新的思路。

**关键词** 成像系统; 双模式; 复眼; 大视场; 高分辨率

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.091102

## Research on Dual-Mode Compound Eye Imaging System

Xu Meng, Wang Yanqin, Wang Changtao, Li Junhui, Luo Xiangang

*State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

**Abstract** The compound eye imaging system, with such advantages as large field of view (FOV), small size, and light weight, has been extensively studied at home and abroad in recent years, and is one of the future development directions of optical imaging technology. Due to the smaller diameter of the sub-aperture, the existing compound eye system with large FOV is difficult to obtain high resolution images, and therefore cannot meet the requirements in such fields as remote sensing and aerial reconnaissance. To solve these problems, a dual-mode compound eye imaging system is proposed in this paper. This system not only has the imaging capability of multi-aperture and wide FOV as in the conventional compound eye, but also can enhance the imaging resolution significantly while all sub-apertures point at identical direction and the captured sub-images are processed by high resolution reconstruction. The principle and implement method of the system are analyzed. The feasibility of dual-mode imaging is verified by constructing an experimental device, which provides an innovative idea for the development of compound eye imaging system.

**Key words** imaging systems; dual-mode; compound eye; large field of view; high resolution

**OCIS codes** 110.1220; 110.4155; 220.4830; 100.6640

## 1 引 言

复眼成像系统是通过昆虫复眼的仿生设计<sup>[1]</sup>、由若干子孔径组成的多孔径成像系统。现有复眼系统主要由子孔径视场(FOV)的拼接实现了大视场效果,例如德国 Duparré 研究小组<sup>[2-3]</sup>的球面人工复眼、瑞士 Floreano 课题组<sup>[4]</sup>的曲面人工复眼(CurvACE)等研究,都较好地完成了轻量化和大视场的设计目标;前者通过 112 个子孔径实现了  $31^\circ \times 31^\circ$  视场,后者则以  $42 \times 15$  的微透镜阵列获得了  $180^\circ \times 60^\circ$  视场。通常这类

**收稿日期:** 2017-03-17; **收到修改稿日期:** 2017-05-09

**基金项目:** 国家 973 计划(2013CBA01700)、国家自然科学基金(61575203)

**作者简介:** 许 盟(1992—),男,硕士研究生,主要从事复眼成像方面的研究。E-mail: xm9209@126.com

**导师简介:** 王彦钦(1984—),男,博士,副研究员,主要从事轻量化和微纳结构成像方面的研究。

E-mail: wangyq117@163.com

\* 通信联系人。E-mail: lxg@ioe.ac.cn

复眼系统都是采用增加子孔径数量的方式增大视场。在系统整体尺寸有限的情况下,子孔径总数越多,意味着其口径越小,成像分辨率越难以提升。因此,传统复眼系统虽然视场较大,但存在分辨率低的问题,其有效分辨率受限于子孔径分辨率。

本文提出的双模式复眼成像系统,对常见复眼成像方式进行了改进。该系统有两种不同状态,即大视场模式和高分辨模式;在大视场模式下,该系统与普通复眼系统相同,可获得大视场、低分辨率的图像;在高分辨模式下,该系统将所有子孔径光轴指向同一区域,可获得一系列信息关联的子图像,再通过图像重建算法得到该区域的高分辨率图像。上述方法综合了大视场复眼成像和传统高分辨率单孔径成像的优势,为空间遥感、航空侦察等应用提供了一种新的技术方案。

本文阐述了双模式复眼成像系统的原理和实现方法,设计并制作了一套双模式复眼成像系统实验装置,对成像效果进行了验证和分析。

## 2 原 理

双模式复眼成像系统由  $N \times N$  个子孔径组成。在大视场模式下,每个子孔径类似昆虫的单个小眼,仅对自身光轴附近小范围视场成像,将所有子孔径图像进行拼接,可得到视场扩大的图像,如图 1(a) 所示。受限于子孔径分辨率,该模式的成像分辨率往往较低。高分辨模式的基础是图像处理领域中的高分辨重建算法,该类算法的原理是:对于相同区域成像的多幅图像之间,如果存在亚像素级的偏移,可将偏移量中的冗余信息恢复为细分的像素,从而提高图像分辨率<sup>[5]</sup>。由于复眼系统子孔径的位置差别,同一景物在不同子孔径中成的像存在亚像素偏移,因此具备图像重建的条件<sup>[6-8]</sup>。图 1(b) 是高分辨模式示意图,所有子孔径光轴都指向红框区域,得到  $N \times N$  幅有亚像素偏移的子图像,利用重建算法即可处理出该区域的高分辨率像。

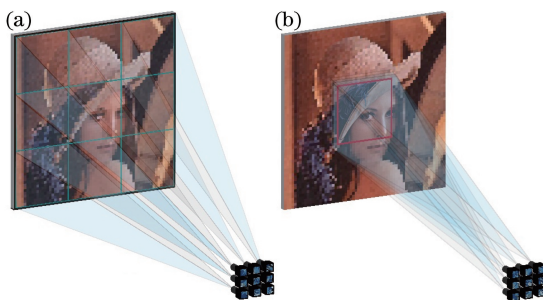


图 1 双模式复眼成像示意图。(a)大视场模式;(b)高分辨模式

Fig. 1 Schematic of dual-mode compound eye imaging. (a) Large FOV mode; (b) high resolution mode

### 2.1 大视场模式分析

大视场模式下,子孔径对准不同方向采集一系列子图像,通过拼接实现大视场成像,此时系统总视场等于所有子孔径视场的覆盖范围。子图像拼接需要充满整个视场,相邻图像间应存在重叠部分,以避免盲区出现。以曲面式大视场复眼系统为例,图 2 中子孔径均匀分布在曲面上, $\varphi$  是单个子孔径的视场, $\theta$  是相邻子孔径视场重叠的角度, $L$  是相邻子孔径的中心间距, $\omega$  是复眼系统总视场。物面 curve 1 粗虚线部分是视场盲区,物面 curve 2 处相邻子孔径视场刚好相接,物面 curve 3 粗实线部分是重叠视场,可以看出视场重叠情况随物面距离变化。由三角关系可知,curve 2 与子孔径的距离近似为  $(L/2)/\tan(\theta/2)$ ,设计时应保持实际物面位于 curve 2 以外。如果物距足够大,可以忽略  $L$  的影响,得到  $\omega = N\varphi - (N-1)\theta$ ,其中  $N$  是子孔径数。研究设计的大视场模式中,子孔径采用平面阵列的方式均匀分布,在物距较远的情况下,上述两个公式仍然近似成立。

子图像拼接算法的选择对合成图像质量有较大影响。由于视场重叠情况与物距相关,子图像之间的重叠尺寸并不固定,因此采用基于特征点匹配<sup>[9]</sup>的拼接算法比较合适,可以避免子图像重叠比例变化对拼接的影响。需要注意的是,为实现匹配和坐标变换计算,该算法要求重叠区存在足够多用于提取特征的细节或角点。

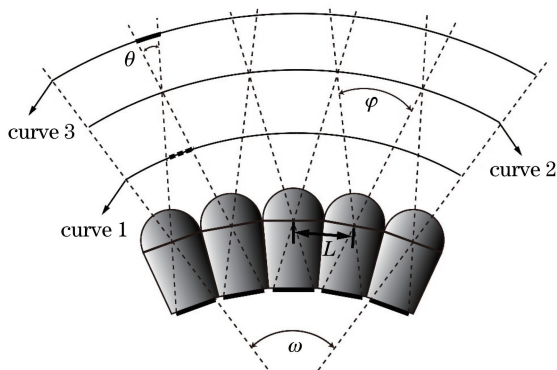


图 2 大视场模式示意图

Fig. 2 Schematic of large FOV mode

## 2.2 高分辨模式分析

在图像传感器采样率和光圈数相同的情况下,高分辨模式等效于用  $N \times N$  复眼系统代替传统的单孔径成像系统。图 3 中将单孔径系统焦距由  $f$  缩短为  $f/N$ 、口径由  $d$  缩小为  $d/N$  后,作为复眼系统的子孔径。由于复眼子孔径与单孔径系统的像方分辨率相同,因此物方分辨率与焦距成正比,此时前者的物方分辨率只有后者的  $1/N$ 。子孔径的位置差别造成了像的偏移,利用重建算法恢复出  $N \times N$  幅子图像偏移带来的冗余信息,可获得远优于子孔径甚至接近单孔径系统的分辨率。与单孔径系统相比,复眼系统的高分辨模式能够显著减小长度和重量,同时保留了高分辨率特性。

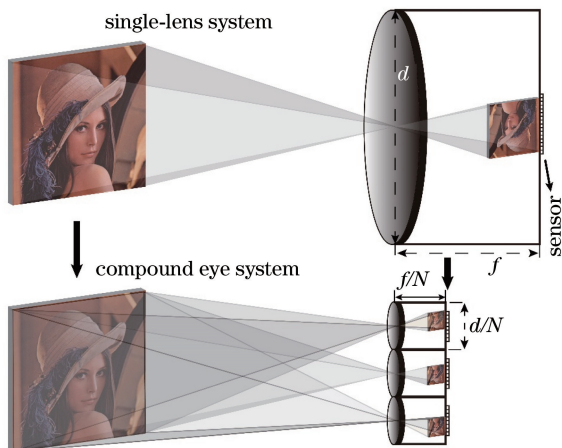


图 3 高分辨模式示意图

Fig. 3 Schematic of high resolution mode

复眼系统成像过程可视为原始高分辨率图像经过模糊、降采样和偏移等降质处理,然后加入噪声在图像传感器上形成  $N \times N$  幅子图像的过程<sup>[10]</sup>。原始高分辨率图像可等效于前述单孔径系统获取的图像。以上过程的数学模型用矩阵方程表示:

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{D}\mathbf{H}_k\mathbf{T}_k\mathbf{X} + \mathbf{V}_k, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{X}$  是待求高分辨图像; $\mathbf{D}$  为降采样算子; $\mathbf{L}_k$  是第  $k$  幅低分辨率子图像; $\mathbf{H}_k$ 、 $\mathbf{T}_k$  和  $\mathbf{V}_k$  分别是该幅子图像的模糊算子、偏移算子和噪声<sup>[11-12]</sup>。降采样导致复眼子图像尺寸减小,仅为原始图像的  $1/N$ 。偏移算子可通过图像配准算法或星点法标定得到。模糊算子可通过平行光管预先测得,更实际的方法是利用图像边缘数据进行拟合求解<sup>[13-14]</sup>。不同子孔径对应不同参数,如果把(1)式看作一个线性方程,可以认为  $N \times N$  幅子图像是以  $\mathbf{X}$  为解的线性方程组。转换为 2 范数的形式求最优解<sup>[15-17]</sup>:

$$\hat{\mathbf{X}} = \operatorname{argmin} \left( \sum_{k=1}^{N \times N} \|\mathbf{L}_k - \mathbf{D}\mathbf{H}_k\mathbf{T}_k\mathbf{X}\|_2 + \lambda \|\mathbf{C}\mathbf{X}\|_2 \right), \quad (2)$$

式中最后一项是正则项, $\mathbf{C}$  是正则算子, $\lambda$  是正则项系数。由于该方程矩阵维数较高,直接求解十分困难,考

考虑采用最速下降法进行迭代。在高分辨模式下,该算法的求解效果主要受偏移算子和模糊算子的影响。理论上,当子图像之间的偏移刚好为  $1/N$  个像素时,冗余信息最多,图像重建质量最好<sup>[18-19]</sup>。实际应用中,子图像偏移量通常不均匀,边缘拟合得到的模糊算子可能存在误差,两者都会导致重建效果降低。

### 3 实验研究

#### 3.1 实验装置

基于研究提出的成像原理,设计并制作了一套双模式复眼成像系统,由均匀分布在同一平面的  $5 \times 5$  个子孔径组成。每个子孔径所包含的相机和镜头如图 4(a)所示。实验中对图 4(b)的 USAF-1951 分辨率板进行成像,对比两种模式分辨率的提升情况。图 4(c)中复眼系统处于大视场模式,所有子孔径对准不同方向。图 4(d)是高分辨成像模式,所有子孔径光轴一致,对相同视场区域成像。两种模式通过偏转子孔径光轴指向进行转换,不同偏转位置由转动机构的限位孔确定。

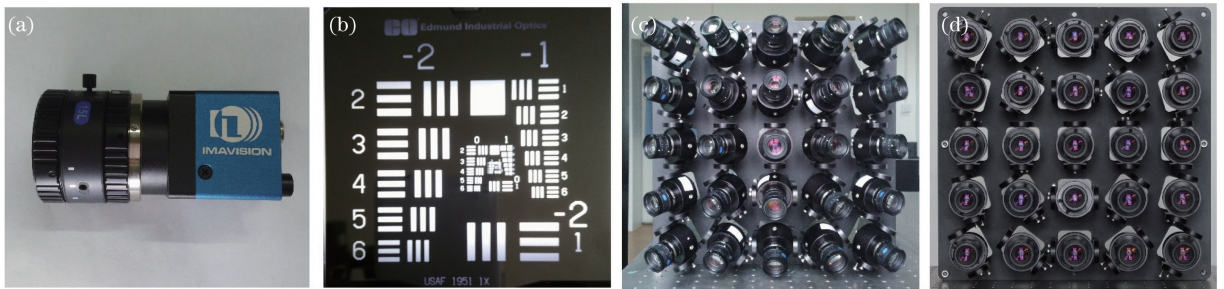


图 4 实验装置。(a)单个子孔径;(b) USAF-1951 分辨率板;(c)大视场模式;(d)高分辨模式

Fig. 4 Experimental device. (a) Single sub-aperture; (b) USAF-1951 resolution plate; (c) large FOV mode; (d) high resolution mode

图 5 中,复眼实验装置放置于防震台上,对分辨率板进行成像。子孔径镜头焦距为 12 mm,光圈数为 4,传感器芯片尺寸为  $1/2.5$  in(1 in=2.54 cm),像素尺寸为  $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ ,水平视场为  $27.0^\circ$ ,垂直视场为  $20.3^\circ$ ,物距为 1500 mm,子孔径中心距离为 70 mm。系统总视场设计为  $90^\circ \times 70^\circ$ ,经计算子孔径视场的重叠角度  $\theta$  为水平方向  $11.2^\circ$ ,竖直方向  $7.9^\circ$ 。不考虑物距影响时,相邻子孔径图像重叠比例大约为 40%,物距较小时,重叠比例将小于该值。成像距离大于 506.9 mm 时,子图像之间无盲区。

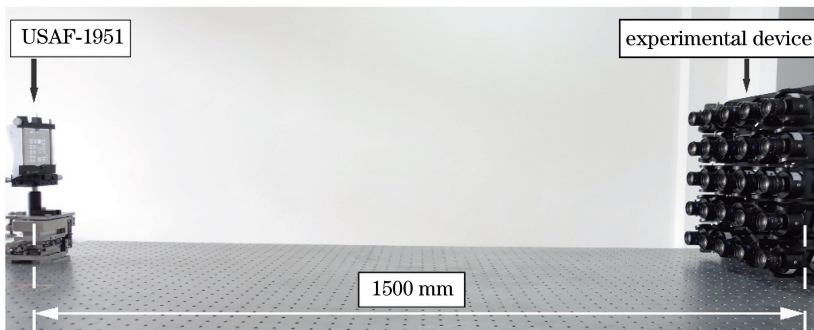


图 5 实验光路

Fig. 5 Experimental optical path

#### 3.2 大视场成像效果

大视场成像实验模拟了昆虫复眼成像效果,采用基于加速健壮特征(SURF)的特征点匹配算法进行图像拼接。通过特征匹配建立新坐标系<sup>[20]</sup>,并将坐标转换后的子图像融合到最终图像中。

图 6(a)是实验得到的  $5 \times 5$  幅子图像,图 6(b)是图像拼接效果,图 6(b)中视场范围与图 6(a)中所有子图像的总视场完全匹配。通过房间位置关系推算出最大水平视场约为  $85^\circ$ ,最大垂直视场约为  $66^\circ$ 。实验在室内近距离小范围内开展,子孔径中心间距  $L$  无法忽略,实际视场比设计值略小。图 6(b)中边缘有弯曲现

象,且存在部分黑色填充区域。造成前者的原因是坐标转换导致边缘视场产生类似鱼镜头的透视失真,后者主要源于镜头和相机的安装及偏转误差。

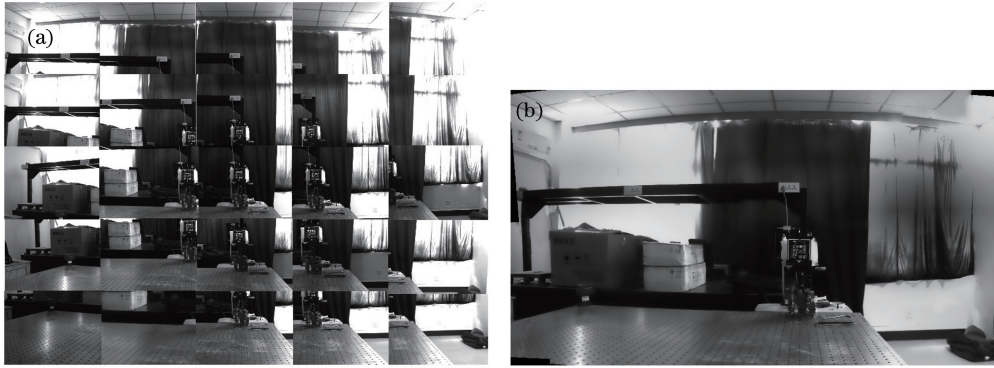


图 6 大视场模式成像效果。(a)  $5 \times 5$  幅子图像;(b) 图像拼接效果

Fig. 6 Imaging effect of large FOV mode. (a)  $5 \times 5$  sub-images; (b) effect of image splicing

### 3.3 高分辨成像效果

高分辨模式实验主要对 USAF-1951 分辨率板进行成像和判读。由于实验光路长度有限,不同子孔径之间存在较大视差,使子图像之间的重合部分有所减少,如图 7(a)所示。同时,高分辨重建算法复杂度随图像尺寸增加而急剧增大,因此实验只截取分辨率板区域进行重建,如图 7(b)所示。

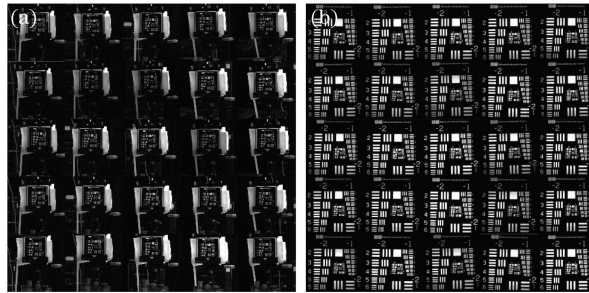


图 7 高分辨模式成像效果。(a)  $5 \times 5$  幅子图像重合部分;(b) 分辨率板部分

Fig. 7 Imaging effect of high resolution mode. (a) Superposition part of  $5 \times 5$  sub-images; (b) resolution plate sections

分辨率以最大可分辨条纹为判读标准。首先计算子孔径分辨率,相机采样率对应的线对数  $N_{\text{sensor}} = 227.3 \text{ lp/mm}$ 。在像面处,理想光学系统截止频率对应线对数  $N_{\text{optic}} = 1/(\lambda F)$ 。取波长  $\lambda = 550 \text{ nm}$ ,光圈数  $F = 4$ ,得到  $N_{\text{optic}} = 454.5 \text{ lp/mm}$ ,大于  $N_{\text{sensor}}$ ,因此像方最高分辨率线对数为  $227.3 \text{ lp/mm}$ 。对短焦系统,像方和物方分辨率满足相似三角形关系:  $N_{\text{object}} = (l/f) \times N_{\text{image}}$ ,其中  $l$  是物距,  $f$  是镜头焦距,  $N_{\text{object}}$  和  $N_{\text{image}}$  分别是物方和像方线对数。计算可得子孔径的物方分辨率为  $1.82 \text{ lp/mm}$ 。

图 8(a)是单幅低分辨率子图像,图 8(b)是其局部放大图。从图中可以看出,单个子孔径最大分辨率在分辨率板第 0 组 6 号条纹处,对应  $1.78 \text{ lp/mm}$ ,略低于理论最高分辨率  $1.82 \text{ lp/mm}$ 。

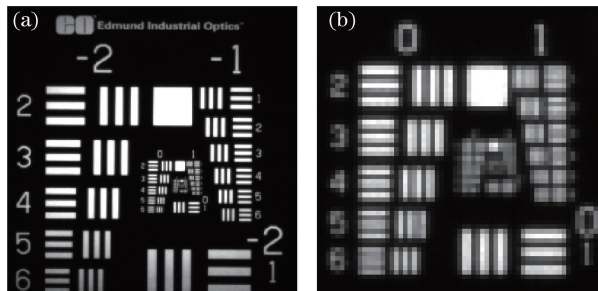


图 8 单个子孔径成像效果。(a) 低分辨率子图像;(b) 局部放大

Fig. 8 Imaging effect of single sub-aperture. (a) Low resolution sub-image; (b) local enlargement

图 9(a)是  $5 \times 5$  幅子图像高分辨重建结果,图 9(b)是其局部放大。可以看出最高分辨率在 USAF-1951 分辨率板第 1 组 6 号条纹处,对应线对数为  $3.56 \text{ lp/mm}$ ,重建后的图像分辨率是单幅子图像的两倍。

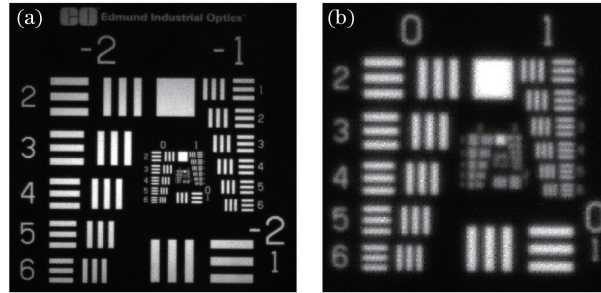


图 9 图像重建效果。(a)重建图像;(b)局部放大

Fig. 9 Effect of image reconstruction. (a) Reconstructed image; (b) local enlargement

## 4 结 论

介绍了双模式复眼系统的原理,设计并制作了一套实验装置,获得了大视场和高分辨率两种成像效果,验证了设计思路的可行性。相比于传统复眼系统,双模式复眼系统的尺寸有所增加,需要额外的机械结构,但合理的设计可以减轻其影响。在大视场模式实验中,拼接后的图像实现了  $85^\circ \times 66^\circ$  的视场,略低于设计视场。在高分辨模式下,成像分辨率提高至大视场模式的两倍左右,但受到算法、装配精度等因素限制,并未达到对应单孔径系统的成像效果。两种模式都有进一步提升的空间。

未来改进方向包括继续优化算法、提高加工装校精度、增加复眼数量和光轴调节自由度等。改进后的系统不仅具有超大视场成像能力,还可根据需求对子孔径进行分阵列组合,同时提高多个观测区域的分辨率。实用性方面,如果选择更小的镜头和传感器、增加用于图像算法加速和机械控制的硬件,并在此基础上进行光机电一体化设计,可以进一步提高系统集成度、降低体积和质量,有望促进双模式复眼成像系统的实际应用。

## 参 考 文 献

- [1] Hao Yongping, Li Lun. New progress in structure design and imaging systems of artificial compound eye[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(12): 1407-1412.  
郝永平, 李 伦. 仿生复眼结构设计及其成像系统研究新进展[J]. *激光与红外*, 2015, 45(12): 1407-1412.
- [2] Radtke D, Duparré J, Zeitner U D, *et al.* Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye[J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3067-3077.
- [3] Duparré J, Radtke D, Tunnermann A. Spherical artificial compound eye captures real images[C]. *SPIE*, 2007, 6466: 64660K.
- [4] Floreano D, Pericet-Camara R, Viollet S, *et al.* Miniature curved artificial compound eyes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(23): 9267-9272.
- [5] Shen Huanfeng, Li Pingxiang, Zhang Liangpei, *et al.* Overview on super resolution image reconstruction[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(2): 194-199.  
沈焕锋, 李平湘, 张良培, 等. 图像超分辨率重建技术与方法综述[J]. *光学技术*, 2009, 35(2): 194-199.
- [6] Tanida J, Kumagai T, Yamada K, *et al.* Thin observation module by bound optics (TOMBO): concept and experimental verification[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(11): 1806-1813.
- [7] Kitamura Y, Shogenji R, Yamada K, *et al.* Reconstruction of a high-resolution image on a compound-eye image-capturing system[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(8): 1719-1727.
- [8] Choi K, Schulz T J. Signal-processing approaches for image-resolution restoration for TOMBO imagery[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): B104-B116.
- [9] Zhang Ruijuan, Zhang Jianqi, Yang Cui. Image registration approach based on SURF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 160-165.

- 张锐娟, 张建奇, 杨 翠. 基于 SURF 的图像配准方法研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 160-165.
- [10] Gao Yuan. Spatial resolution enhancement technology of flat compound-eye imaging systems[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, 2015: 8-23.  
高 源. 平面复眼空间分辨率增强技术研究[D]. 成都: 光电技术研究所, 2015: 8-23.
- [11] Barrett H H, Myers K J. Foundations of image science[M]. New York: Wiley Interscience, 2004.
- [12] Zhao Hui, Jiang Zhiguo, Zhao Danpei, *et al.* Sequence of images super-resolution joint reconstruction algorithms[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009, 28(5): 45-49.  
赵 慧, 姜志国, 赵丹培, 等. 序列图像超分辨率联合重建算法[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(5): 45-49.
- [13] Lü Chenghuai, He Xiaohai, Tao Qingchuan, *et al.* Research on estimation algorithms for Gaussian point spread function parameter in image restoration[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(10): 31-34.  
吕成淮, 何小海, 陶青川, 等. 图像复原中高斯点扩展函数参数估计算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(10): 31-34.
- [14] Chen Qihang, He Bin, Wang Junqi. Optimal extraction for edge spread function in knife-edge method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 111003.  
陈起行, 何 斌, 王俊琦. 刃边法边缘扩散函数最优提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 111003.
- [15] Xiao Su, Han Guoqiang, Wo Yan. Survey of digital image super resolution reconstruction technology[J]. Computer Science, 2009, 36(12): 8-13.  
肖 宿, 韩国强, 沃 焱. 数字图像超分辨率重建技术综述[J]. 计算机科学, 2009, 36(12): 8-13.
- [16] Hu Zhigang, Hua Xianghong. Deriving Tikhonov parameter using optimal regularization method [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(2): 51-53.  
胡志刚, 花向红. 利用最优正则化方法确定 Tikhonov 正则化参数[J]. 测绘科学, 2010, 35(2): 51-53.
- [17] Hu Jiangtao, Huang Feng, Zhang Chu, *et al.* Research status of super resolution reconstruction based on compound-eye imaging technology[J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 492-496.  
胡江涛, 黄 峰, 张 雏, 等. 超分辨率重构复眼成像技术的研究进展[J]. 激光技术, 2015, 39(4): 492-496.
- [18] Li Yapeng, He Bin. Improving image quality by using CCD subpixel imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211001.  
李亚鹏, 何 斌. 采用 CCD 错位成像技术提高图像质量[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211001.
- [19] Xu Shaoxiong, Chen Changzheng, Sun Bin, *et al.* High-resolution imaging by bi-linear CCD shifting sampling [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0908002.  
徐少雄, 陈长征, 孙 斌, 等. 双线阵 CCD 错位采样高分辨成像[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0908002.
- [20] Chen Jihua, Guo Wensong. Method of panoramic image stitching for theodolite-camera system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051001.  
陈继华, 郭文松. 基于摄影经纬仪的全景图像拼接方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051001.