

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.04.002

# 大视场紧凑型仿生复眼成像系统研究

裘 溯<sup>1</sup>, 薛家安<sup>1</sup>, 王 霞<sup>1</sup>, 李磊磊<sup>2</sup>, 陈家斌<sup>2</sup>

- (1. 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京理工大学光电学院, 北京 100081;  
2. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081)

**摘要:**针对视觉导航系统对小型化、超分辨率成像和近程立体视觉的需求,研究了一种基于微端面光纤面板的大视场紧凑型仿生复眼成像系统。利用视轴发散的微小型透镜组进行大视场成像,并以切削斜端面的光纤面板进行图像传输,将大面阵(5120×5120像素)CMOS相机与光纤面板后端面直接耦合实现图像输出,可实现9个视场部分重叠子孔径图像同步实时输出和采集。在实时化拼接处理中,利用CUDA并行加速方法进行图像拼接,单帧的拼接耗时小于30ms。视场部分重叠复眼成像模式还可配置偏振片或滤光片构成全偏振或多光谱成像,在天空偏振光导航、无人机紧急避障、弹载侦察、近程引信以及水下无人潜航器导航等领域具有广泛的应用前景。

**关键词:**仿生复眼;多微端面光纤面板;CMOS耦合;多孔径成像;CUDA并行加速;实时拼接

中图分类号:TH741

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:2095-8110(2020)04-0011-08



## A Large-field-of-view Compact Bionic Compound Eyes Imaging System Research

QIU Su<sup>1</sup>, XUE Jia-an<sup>1</sup>, WANG Xia<sup>1</sup>, LI Lei-lei<sup>2</sup>, CHEN Jia-bin<sup>2</sup>

- (1. Key Lab of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** According to the requirements of visual navigation system, that is miniaturization, super-resolution and short-distance stereovision, a large field of view(FOV) compact bionic compound eyes imaging system based on micro-surface fiber faceplate is studied. The bionic compound eyes imaging system uses nine micro-lens-groups with divergent-angled lines-of-sight for large FOV imaging, and uses the optical fiber panel with oblique cutting micro-surface for image transmission. The large area(5120×5120pixels) CMOS camera is directly coupled with rear surface of the optical fiber panel for image output. It can realize nine partially overlapping FOVs sub-aperture imaging with synchronized output. The CUDA parallel acceleration method is used to achieve real-time large-FOV image stitching. With polarizers or filters, the compound eyes partial-overlap-of-fields imaging mode can implement full-polarization imaging or multispectral imaging. And it could have broad application prospects in the fields of sky-polarized-light navigation, obstacle emergency avoidance, missile reconnaissance with short-range fuse control, and underwater

收稿日期:2020-02-04;修订日期:2020-02-26

基金项目:装备预先研究项目(41417070401, 30102070103)

作者简介:裘溯(1973-),男,讲师,硕士生导师,主要从事微光与红外技术、选通成像技术、数字图像处理的研究。

E-mail: edmondqiu@bit.edu.cn

unmanned submarine navigation.

**Key words:** Bionic compound eyes; Multi-surface fiber faceplate; CMOS coupling; Multi-aperture imaging; CUDA parallel acceleration; Real-time stitching

## 0 引言

昆虫复眼是一种理想的小型化、多孔径、大视场的视觉系统,具有智能特征,对运动目标有很高的探测灵敏度,且对光的强度、波长和偏振等都有较强的分辨力。因此,仿生复眼技术与系统在小型无人机、无人车、武器制导、水下潜航器等领域展现出广泛的应用前景,成为人们长期以来研究的重要方向。光纤和光纤集束由于弯曲灵活、加工方便的特点,可以解决大视场多孔径复眼成像系统的图像传输和中继问题,因此在国内外复眼系统中得到广泛应用。

2004年,R. Hornsey等<sup>[1-2]</sup>设计了基于柔性光纤集束的复眼系统 Dragonfl Eye,系统子眼透镜将场景成像到刚性定位的光纤束上,使用相机对光纤束后端面进行拍摄,系统总视场约为 $100^\circ$ ;2005年,J. Kim等<sup>[3]</sup>将微透镜阵列耦合在聚合物光波导阵列端面的复眼结构,实现了与真实生物复眼结构相似的微透镜-波导一一对应的模式,其单眼视场角为 $\pm 0.75^\circ$ ,也与真实生物复眼相同;2007年,L. C. Laycock等<sup>[4-5]</sup>提出了一种基于多微面光纤面板的仿昆虫复眼成像系统,采用光纤面板切削端面对不同方向的光信息进行采集,简化了仿生复眼的光学系统,实现了 $120^\circ$ 的大视场成像;2010年,D. V. Hahn等<sup>[6]</sup>利用微透镜成像,使用方形光纤面板实现了与光学探测器的耦合,提高了探测器的总视场角,微透镜和光纤束之间通过压电装置实现相对微位移对准;2012年,吴俊峰等<sup>[7]</sup>设计了塑料光纤束中继的微透镜阵列复眼系统,以满足可见光大视场无线通信的需要;2015年,Deng S等<sup>[8]</sup>将光刻的六边形微透镜曲面阵列耦合在内窥镜光纤束平端面,实现了大视场成像;2019年,Liu F等<sup>[9]</sup>将模具制作和飞秒激光辅助微加工的微透镜复眼结构,通过高精度的纳米压印转印到聚合物光纤束端面上,实现了端面集成 $400+$ 球形微透镜的结构,使成像系统接收角和有效数值孔径都提高了 $40\%$ ;2019年,Zheng Y等<sup>[10]</sup>设计了一种纤径 $6\mu\text{m}$ 的圆顶光锥,将曲面微透镜阵列成像中继到探测器面,实现了 $90^\circ$ 的视场和 $8.6\%$ 相对误差的三维测距能力。

总结以上研究发现,利用不同形状端面或不同弯曲方式的光纤元件,能收集各个视轴方向的(微)透镜成像,从而实现与昆虫复眼原理相似的大视场成像。北京理工大学金伟其研究团队于2011年开始进行仿生复眼的研究<sup>[11]</sup>,重点研究了基于微端面光线面板的视场部分重叠仿生复眼理论、技术和系统。

本文基于课题组对多微面光纤面板的仿生复眼系统的研究基础<sup>[12-13]</sup>,介绍了一种基于微端面光纤面板的紧凑型可见光仿生复眼系统设计,通过9个视轴发散的小型化物镜+微端面光纤面板+大面阵( $5120\times 5120$ )CMOS组件的直接耦合,构成紧凑型仿生复眼成像系统,并利用角度一致化约束的图像配准方法,结合CUDA(Compute Unified Device Architecture)加速实现了实时化大视场拼接成像。本文主要介绍了基于微端面光纤面板的仿生复眼成像理论和结构设计,并阐述了配准方法和实时拼接方法。

## 1 仿生复眼成像系统理论和设计

### 1.1 基于微端面光纤面板的视场部分重叠仿生复眼成像理论

基于微端面光纤面板的仿生复眼成像过程如图1(a)所示,该系统由子眼镜头-光纤面板-CMOS耦合相机组成。场景通过复眼子眼成像于光纤面板的前微端面上,再通过光纤面板将像传输于面板后端面上,最后使用大面阵CMOS相机进行耦合,以输出后端面采集的图像,如图1(b)所示。

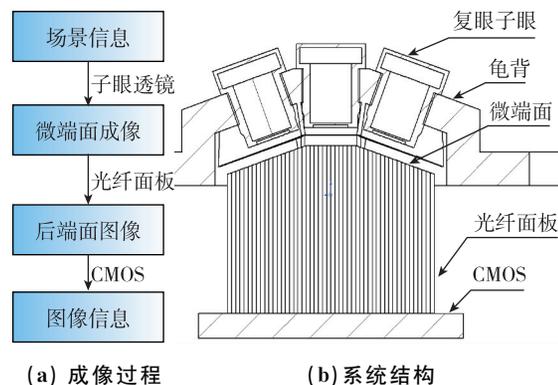


图1 仿生复眼成像系统总体结构

Fig. 1 Architecture of bionic compound eyes imaging system

镜头支撑架上的 9 个复眼光学镜头轴线分别与对应各微面中心的法线重合,且微面与光学镜头主面的距离为镜头的焦距  $f'$ ;微端面光纤面板的另一端与 CCD/CMOS 成像传感器耦合,实现多孔径成像场景图像在单一成像传感器上的同时成像采集。

光纤面板的微端面切削倾角与相邻子眼成像视场的重叠率密切相关,根据文献[12]可以将视场重叠情况分为低度重叠率、中度重叠率和高度重叠率等类型,本文的研究侧重于中度重叠率( $\sim 50\%$ )情况,如图 2(a)所示,可实现大视场变空间分辨率成像、空间目标场景 3D 成像与快速运动目标定位等功能,还能够实现全偏振成像和多波段成像等多孔径成像特性。

由于上下左右侧面子眼与顶面子眼的视场重叠率接近 50%,假设单孔径系统的成像视场为 FOV,则侧面子眼与顶面子眼之间的夹角  $\theta$  等于  $FOV/2$ ,如图 2(b)所示,角面子眼与顶面子眼之间的视场重叠率约为 25%;此外,由于侧面和角面的倾角,造成其实际成像存在相应方向的投影,交叠视场为不规则四边形区域,需要在配准时进行投影变换校正。最终得到的拼接成像视场及其重叠情况如图 2(a)所示,区域内的数字代表视场有交叠的子眼个数。

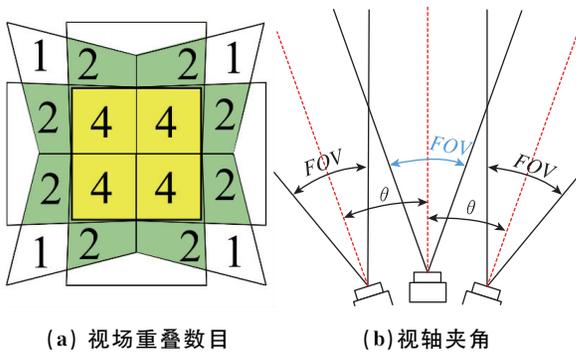


图 2 复眼系统视场分布  
Fig. 2 FOV distribution of compound eyes system

### 1.2 微端面光纤面板和小型化子眼物镜设计

本文选用的光纤面板直径为 25mm,纤芯直径为  $10\mu\text{m}$ 。光纤面板顶微端面是一个边长为 6.14mm 的正方形区域,顶面和侧面夹角为  $20^\circ$ ,顶面和角面夹角为  $27^\circ$ 。图 3(a)所示为切割完成后光纤面板实物,经检测微端面光纤面板切面尺寸误差小于 0.1mm,切面角度误差小于  $0.017^\circ$ ,满足系统的成像质量要求和图像拼接精度要求。

对于仿生复眼的成像系统,本文实验系统的视场重叠率为 50%,对顶面与侧面倾角为  $20^\circ$ 的微端面光纤面板进行设计,复眼子眼视场需  $\geq 40^\circ$ ,为此,设计的小型化子眼物镜焦距为 9mm,后截距为 4.92mm,畸变小于 0.5%。子眼物镜中设有光阑位置,可设置不同大小的光阑孔径实现对通光量的控制,如图 3(b)所示。

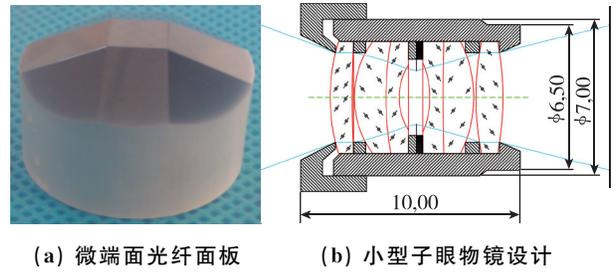


图 3 复眼系统成像和中继元件  
Fig. 3 Imaging and relay components of compound eyes system

### 1.3 镜头支架设计

由于微端面光纤面板的形状需要使得与之相配的小型物镜支架偏离微端面,故采用了龟背型支架系统。首先确定各个面中子眼的开孔位置和遮光片的安装位置,再使用 SolidWorks 对镜头支架进行设计。

镜头支架的总体厚度为 4mm。侧面子眼与顶面子眼的光轴夹角为  $20^\circ$ ,角面子眼与顶面子眼的光轴夹角为  $27^\circ$ 。遮光片可以防止不同子眼的光线串扰,处在顶面与侧面、侧面与角面的角平分线上。图 4 所示为镜头支架的设计结果,另外设计镜头支架连接件以固定镜头支架与相机机身,外圈使用 M42 螺纹。

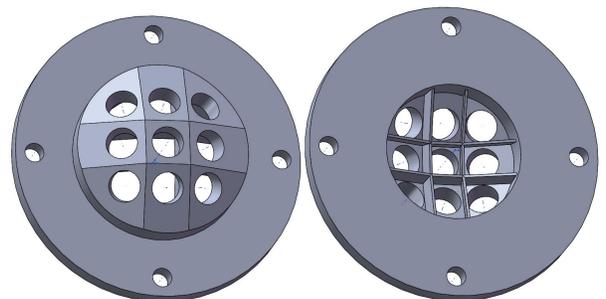


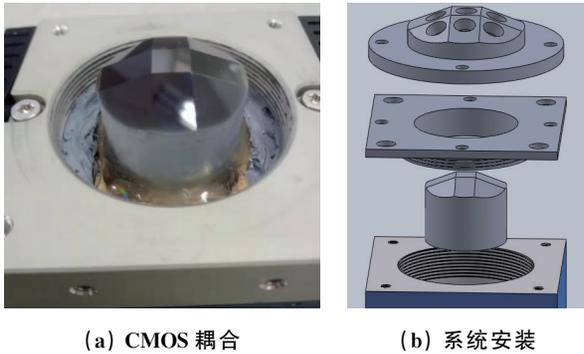
图 4 龟背镜头支架正反面示意图  
Fig. 4 The front and back diagram of turtle-back-shaped lens shell

### 1.4 大面阵 CMOS 相机及系统耦合

相机选用 DALSA 公司的 CMOS 相机 Genie

Nano XL-M5100, 像元规模  $5120 \times 5120$ , 像素尺寸  $4.5 \mu\text{m}$ , 使用 M42 镜头接口, 千兆网口输出, 使用 Turbo Drive 模式图像输出可达 9.5fps。

将微端面光纤面板和 CMOS 感光面直接耦合, 如图 5(a) 所示, 并依次安装连接件、龟背板和 9 个小型子眼镜, 如图 5(b) 所示。在龟背型镜头支架上安装子眼镜, 旋转调节物镜对焦, 最终集成得到 9 个子眼视场部分重叠仿生复眼实验系统, 如图 6(a) 所示。实测系统质量 357g, 体积  $59\text{mm} \times 59\text{mm} \times 56.4\text{mm}$ , 功率 6.3W, 实物如图 6(b) 所示。

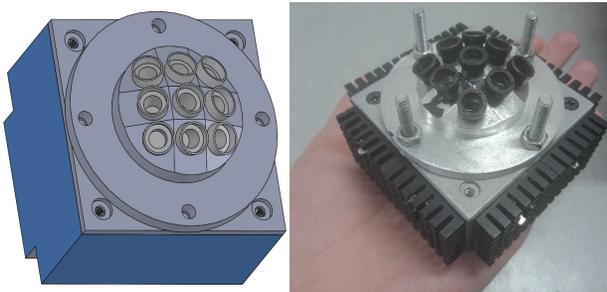


(a) CMOS 耦合

(b) 系统安装

图 5 复眼系统集成

Fig. 5 Integration of compound eyes system



(a) 系统示意图

(b) 系统实物图

图 6 仿生复眼系统

Fig. 6 Bionic compound eyes system

## 2 视场部分重叠仿生复眼实验系统的大视场图像拼接处理

### 2.1 图像输出和成像特点

图 7 所示为系统采集的图像, 经测试可得仿生复眼的总视场为  $83.23^\circ$ , 顶面子眼的视场为  $42.2^\circ$ , 侧面子眼的视场为  $41.5^\circ$ , 角面子眼的视场为  $53.1^\circ$ 。

图 8(a) 所示为系统对积分球内部的拍摄, 能表示成像区域大小和非均匀性分布情况, 图 8(b) 所示为系统成像的有效范围。成像有效范围的定义为: 均匀光线入射时, 内部非均匀性较好的区域平

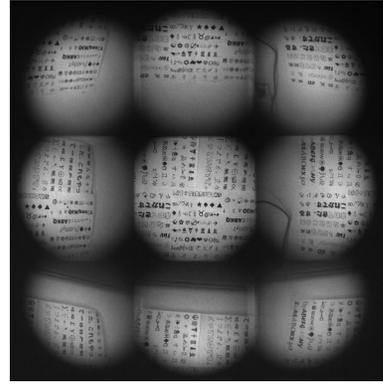
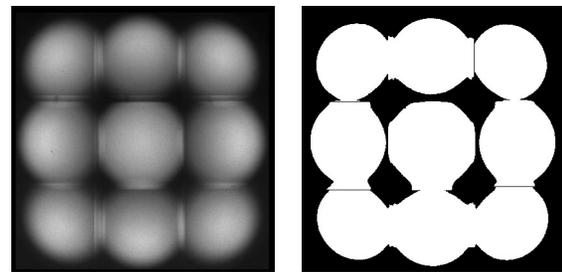


图 7 复眼所成图像

Fig. 7 Bionic compound eyes system

均像素值输出为  $I$ , 则在边缘的亮度下降区域, 存在像素值输出下降到  $0.5I$  时的边界线, 边界线内即有效成像区域。



(a) 成像非均匀分布

(b) 成像有效范围

图 8 复眼有效视场

Fig. 8 Effective FOV of compound eyes system

可认为边界线内部的图像信息虽然存在非均匀性, 但是可以通过校正恢复这一部分信息; 而边界线外部的图像信息由于光强太弱, 且量化误差是有效成像区域的 2 倍, 因而无法进行非均匀性校正。成像有效范围的求取算法为:

1) 分割图像, 人工选取成像中心部分, 计算均值  $I$ ;

2) 将图像进行  $7 \times 7$  均值滤波, 以去除图像中锯齿、突起等不相关细节;

3) 滤波图像以  $0.5I$  为阈值, 进行图像分割;

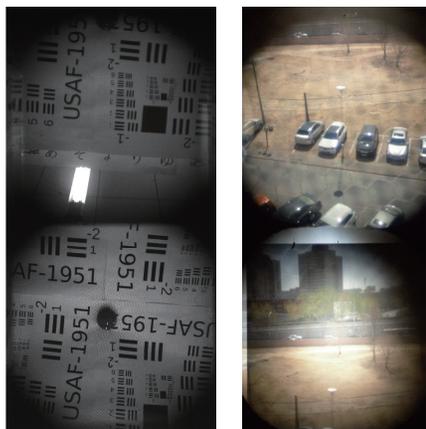
4) 对分割后的图像解算连通域, 寻找最大连通域即有效成像区域;

5) 计算有效成像区域面积, 并画出有效成像区域轮廓。

### 2.2 复眼图像非均匀性校正

在主观评价上, 如图 9 所示, 以上侧子眼和中心子眼为例, 本文 CMOS 耦合复眼系统, 与使用相同

光纤面板的光学耦合复眼系统<sup>[13-14]</sup> (微距相机拍摄后端面)相比,解决了光纤面板本身的六边形花纹阴影问题。并且,由于侧面子眼后端面的出射方向复杂,针对光学耦合复眼系统,只有较少光线可以进入光学系统得以成像,侧面子眼往往曝光不足,而中心子眼又会出现中心区域曝光过度。



(a) CMOS 耦合系统 (b) 光学耦合系统

图 9 复眼系统上、中子眼采集图像

Fig. 9 Effective FOV of compound eyes system

而针对本文的 CMOS 耦合复眼系统,由于 CMOS 耦合引起的光强衰减更小,且后端面出射光线大部分能被 CMOS 吸收,散射损失少,故各个子眼曝光均匀,且不存在局部曝光过度等现象。

在客观评价上,各子眼的非均匀性(Photo Response Non-Uniformity, PRNU)定义为,二分之一饱和曝光量下,有效像元输出的标准差与平均值之比。9 个子眼的非均匀性平均值为 24.10%,与微距相机的光学耦合系统的非均匀性值 52.42%相比,非均匀性情况得到了较大的改善。为了获得均匀的成像,通过一点法非均匀性校正<sup>[14]</sup>,引入像元非均匀性校正系数矩阵,校正后的非均匀性为 2.029%。与图 7 对应的中层子眼的非均匀性校正图像如图 10 所示。



图 10 复眼所成图像

Fig. 10 Bionic compound eyes system

### 2.3 特征点匹配筛选和亚像素级配准

本文通过 KAZA 特征点匹配,利用随机抽样一致性(Random Sample Consensus, RANSAC)和角度一致化方法筛选特征匹配,进行亚像素级配准,并使用相位相关法进行结果评价。

通过 RANSAC 筛选后,仍存在大量错误的特征点匹配,如图 11 所示。因此提出了匹配角度一致化(Matching Angle Unify, MAU)筛选方法,注意到复眼成像系统中相邻子眼图像无旋转变化,因而导致匹配特征点的点间连线近乎平行,可以通过统计连线倾角的算法进行筛选:1)将 180°等分为  $N$  个角度区间,统计各角度区间内连线倾角的数目;2)选择  $N$  个角度区间中,包含匹配连线数目最大的区间;3)只保留角度在该区间范围内的匹配线条,从而去除错误的匹配对。

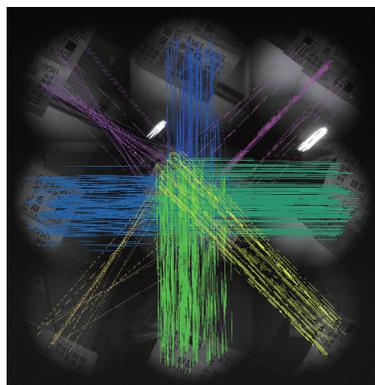


图 11 RANSAC 筛选后的特征点匹配

Fig. 11 Key-points matching after RANSAC screening

本文采用的角度一致化方法,对 RANSAC 筛选后特征点匹配的再筛选结果,如图 12 所示。从图

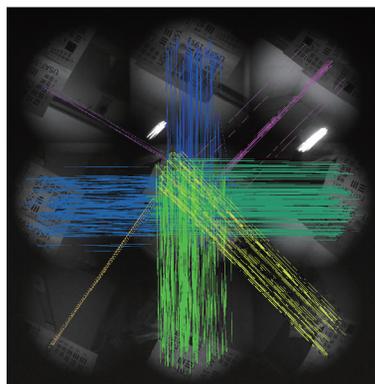


图 12 RANSAC 和角度一致化筛选后的特征点匹配

Fig. 12 Key-points matching after RANSAC and MAU screening

12 中可以看出,所有的错误匹配经过角度一致化再筛选都得到了剔除。

使用角度一致化筛选后的特征点匹配能够计算出更为精确的投影矩阵。由相位相关法分析配准结果如表 1 所示,基于 RANSAC 和角度一致化筛选特征点的图像配准精度误差小于 1 个像素,个别子眼配准精度小于 0.1 个像素,基本达到了亚像素级配准。

表 1 周边子眼与中心子眼(5 号子眼)的配准误差

Tab. 1 Image registration errors of the surrounding eyes and center eye

筛选方法	RANSAC 方法		RANSAC+ MAU 方法	
	高度	宽度	高度	宽度
1	1.3	1.6	0.071	0.32
2	-0.14	0.15	-0.029	0.79
3	-0.62	-0.48	0.04	-0.12
4	-0.060	-0.055	0.054	-0.023
6	0.14	-0.034	0.091	0.028
7	1.4	1.5	0.37	0.88
8	-0.10	0.0028	0.055	0.044
9	0.048	0.091	0.022	0.075

### 3 复眼图像实时拼接处理系统

#### 3.1 Tx2 复眼成像处理系统

本文复眼成像系统使用 Nvidia Tx2 进行图像处理,如图 13 所示。Tx2 使用千兆网口输入复眼图像,使用 15V 电源供电,功率为 7.5W。

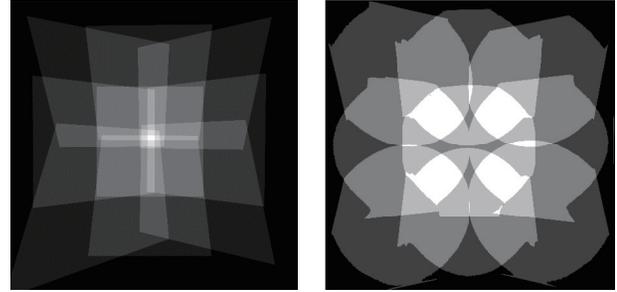


图 13 复眼和 Tx2 成像处理系统

Fig. 13 Compound eyes and Tx2 image processing system

如图 14(a)所示,本文复眼成像系统 CMOS 成像区域经过配准的投影矩阵变换,可以得到复眼系统视场重叠情况。而有效成像区域经过配准的投

影矩阵变换,可以得到有效视场重叠区域,如图 14 (b)所示。中心子眼内部较大比例的 4 个子眼视场重叠能满足之后复眼成像系统的超分辨率和三维重建需求。



(a) CMOS 成像区域

(b) 有效成像区域

图 14 复眼系统实际视场重叠情况

Fig. 14 Effective FOV of compound eyes system

在图像拼接阶段,本文对于已配准的子眼图像,采用平均权重叠加法进行图像融合拼接。以中心子眼图像为基准,对于基准图片上某点  $P$ ,有  $M$  个子眼视场在此重叠,其中的子眼  $n$  配准后在  $P$  点的像素值为  $I_n$ ,子眼  $n$  在非均匀校正系数为  $k_n$ ,则子眼  $n$  的拼接权重  $K_n$  为

$$K_n = \frac{k_n}{\sum_{i=1}^M k_i} \quad (1)$$

该方法保证了各子眼非均匀校正后的图像,在重叠区域具有相同的融合权重。可得,  $P$  点拼接得到的像素值为

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^M \frac{k_n I_n}{\sum_{i=1}^M k_i} \quad (2)$$

拼接效果如图 15 所示,拼接图片无重影。

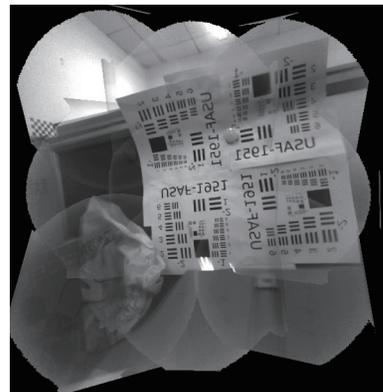


图 15 复眼拼接图像

Fig. 15 Compound eyes stitched image

### 3.2 CUDA 并行加速图像拼接算法

将图像配准和非均匀性校正放在系统初始化阶段进行预处理,CUDA 只进行每帧的并行运算和图像拼接,可极大提高拼接的速度。算法如图 16 所示,其流程是:

- 1) 预处理阶段:软件初始化,确定图像切割矩形 RECT,给变换前后的图像分配内存,读取 9 预配准投影矩阵和非均匀校正标定图像,并计算非均匀校正矩阵和拼接权重矩阵;
- 2) 相机采图阶段:相机将每一帧图像数据暂时存入相机内存缓冲区 m\_Buffers 中;
- 3) 通信传输阶段:利用指针寻址方法,软件将帧图像从 m\_Buffers 拷贝进入 GPU 内存 Device 中;
- 4) 并行拼接阶段:以 RECT 模板切割图像,对每一个子眼图像分别进行图像变换,并平均权重地叠加到拼接背景图像上;
- 5) 通信传输阶段:将帧图像从 GPU 内存 Device 中拷贝到计算机 Host 内存中,并显示;
- 6) 清空缓存区 m\_Buffers,循环进入下一步的 2)中。

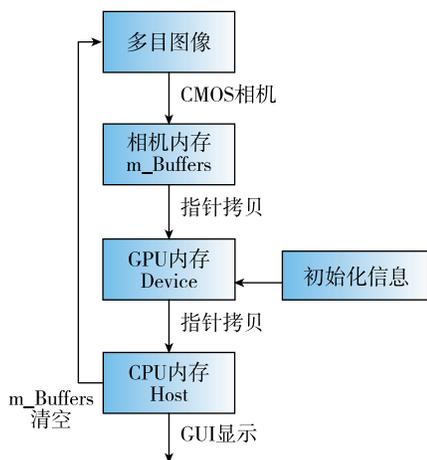


图 16 复眼 CUDA 并行加速图像拼接算法  
Fig. 16 Compound eyes CUDA parallel acceleration stitching algorithm

利用 CUDA 并行加速方法进行图像拼接,单帧的拼接耗时为 30ms,小于 CMOS 相机的图像传输时间 203ms,达到了实时化图像拼接的要求,最终与 Turbo Drive 模式图像结合,拼接图像输出帧率可达 8fps。软件系统输出界面如图 17 所示。



图 17 复眼图像实时拼接处理系统界面  
Fig. 17 GUI of compound eyes real-time image stitching system

### 4 结论

本文设计和实现了基于微端面光纤面板的大视场紧凑型仿生复眼成像系统,针对复眼系统的多子眼视轴发散和视场部分重叠的特点,研究了一种基于空间结构约束筛选方法的亚像素级特征匹配图像拼接算法。复眼系统设计与图像处理结果表明:

1)基于微端面光纤面板的图像传输方法具有设计精度高、成像效果好的特点。本文提出的应用视轴发散的龟背型透镜组支架和 CMOS 直接耦合,是实现复眼成像系统多通道集成和图像输出的有效设计方法。与先前光学耦合复眼系统相比,具有分辨率更高和噪声更小的优势。

2)基于特征点匹配的图像拼接算法,可实现亚像素级别的精确匹配,利用 RANSAC 和角度一致化方法筛选特征匹配,能达到接近 100%的匹配正确率,但本算法也存在着筛选速度慢的问题。今后希望通过进一步优化筛选算法,实现更快速的复眼图像匹配。

3)在复眼成像实时化研究方面,本文所提拼接处理使用 CUDA 并行加速方法,满足了复眼子眼图像实时化拼接的要求。实时化图像配准与复眼偏振探测相结合,可实现偏振图像的快速解算;与三维重建和重叠视场超分辨等算法相结合,可实现变分辨率的三维成像模式,在光电成像探测领域具有广泛的应用前景。

### 参考文献

[1] Hornsey R, Thomas P, Wong W, et al. Electronic compound-eye image sensor: construction and calibration[C]// International Society for Optics and Photonics, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications V. 2004, 5301: 13-24.

- [2] Krishnasamy R, Thomas P, Pepic S, et al. Calibration techniques for object tracking using a compound eye image sensor[C]// International Society for Optics and Photonics, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks. 2004, 5611: 42-52.
- [3] Kim J, Jeong K H, Lee L P. Artificial ommatidia by self-aligned microlenses and waveguides[J]. Optics Letters, 2005, 30(1): 5-7.
- [4] Laycock L C, Handerek V A. Multi-aperture imaging device for airborne platforms[C]// International Society for Optics and Photonics, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IV. 2007, 6737: 673709.
- [5] Laycock L C, Handerek V A. Miniature imaging devices for airborne platforms [C]// International Society for Optics and Photonics, SPIE Europe Security and Defence. Florence, Italy, 2008, 7113: 1-5.
- [6] Hahn D V, Brown D M, Rolander N W, et al. Fiber optic bundle array wide field-of-view optical receiver for free space optical communications[J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3559-3561.
- [7] 吴俊峰, 朱娜, 江晓明. 一种新型可见光无线通信可调复眼光学接收系统[J]. 无线通信技术, 2012(4): 52-55, +58.  
Wu Junfeng, Zhu Na, Jiang Xiaoming. A new type of adjustable compound eye optical array antenna for visible light communication[J]. Wireless Communication Technology, 2012(4): 52-55, +58(in Chinese).
- [8] Deng S, Lyu J, Sun H, et al. Fabrication of a chirped artificial compound eye for endoscopic imaging fiber bundle by dose-modulated laser lithography and subsequent thermal reflow[J]. Optical Engineering, 2015, 54(3): 033105.
- [9] Liu F, Yang Q, Bian H, et al. Artificial compound eye-tipped optical fiber for wide field illumination[J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 5961-5964.
- [10] Zheng Y, Song L, Huang J, et al. Detection of the three-dimensional trajectory of an object based on a curved bionic compound eye[J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4143-4146.
- [11] 金伟其, 林青, 裘溯, 等. 多孔径仿生复眼成像系统技术进展综述[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(6): 15-19.  
Jin Weiqi, Lin Qing, Qiu Su, et al. Progress of multi-aperture bionic compound eye imaging system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2011, 9(6): 15-19 (in Chinese).
- [12] 裘溯, 倪宇, 金伟其, 等. 基于微端面光纤面板的多孔径视场重叠复眼的视场模型[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3018-3025.  
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).
- [13] 杨超, 裘溯, 金伟其, 等. 基于多微面光纤面板的仿生复眼图像拼接及定位算法[J]. 兵工学报, 2018, 39(6): 1144-1150.  
Yang Chao, Qiu Su, Jin Weiqi, et al. Position algorithm and image mosaic research of compound eyes system bases on fiber faceplate[J]. Master Thesis of Beijing Institute of Technology, 2017, 39(6): 1144-1150(in Chinese).
- [14] Zhang Z, Qiu S, Jin W, et al. Image mosaic of bionic compound eye imaging system based on image overlap rate prior[C]// International Society for Optics and Photonics, Optical Sensing and Imaging Technologies and Applications, 2018, 10846: 108462C.