

引用格式: CAO Jie, CUI Huan, MENG Ling-tong, *et al.* Multi-resolution Imaging with Camera Arrays on Curved Surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4):0411003

曹杰, 崔焕, 孟令通, 等. 曲面相机阵列多分辨成像方法[J]. 光子学报, 2020, 49(4):0411003

# 曲面相机阵列多分辨成像方法

曹杰<sup>1</sup>, 崔焕<sup>1</sup>, 孟令通<sup>2</sup>, 郝群<sup>1</sup>, 唐鸣元<sup>1</sup>

(1 北京理工大学 光电学院 机器人与系统教育部重点实验室 北京 100081)

(2 中国科学院电子学研究所 北京 100190)

**摘 要:**针对现有成像系统因数据冗余而无法兼顾大视场、高分辨、高效性的问题,结合人眼视网膜变分辨率成像和并列式复眼成像原理,设计一种多分辨率成像的复合仿生成像系统.该成像系统按照球面和平面兼顾的曲面布局方式,利用 11 个相机镜头构建相机阵列,组成了四个等级分辨率的子眼拍摄模块.通过物距 100 m 的远景实验和物距 10 m 的近景实验发现,该系统在实现高分辨成像的同时,获得总视场达  $150.8^\circ \times 37.8^\circ$ .多分辨率成像实验结果表明,该系统获取的图像的分辨率从中心视场到边缘视场逐渐降低,并且相较于中心清晰全视场成像,四级分辨率成像的拼接图像数据量减少了 17.2 倍的数据冗余.

**关键词:**成像系统;复合仿生成像;多分辨率;大视场;相机阵列;曲面

中图分类号:TN27

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204904.0411003

## Multi-resolution Imaging with Camera Arrays on Curved Surface

CAO Jie<sup>1</sup>, CUI Huan<sup>1</sup>, MENG Ling-tong<sup>2</sup>, HAO Qun<sup>1</sup>, TANG Ming-yuan<sup>1</sup>

(1 *Key Laboratory of Biomimetic Robots and Systems, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

(2 *Institute of Electrics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

**Abstract:** Based on the variable resolution mechanism of human retina and the imaging principle of parallel compound eye, a hybrid bionic imaging system with multi-resolution is proposed to reduce data redundancy and to balance large field of view, high resolution and high efficiency. Given the consideration of both curved and plane surface on the layout, the imaging system included three layers in which the eleven cameras are divided into four groups to obtain images with four different resolutions. Two imaging experiments under the conditions of long distance of 100 m and short distance of 10 m are carried out, the results indicate that the total field of view reaches  $150.8^\circ \times 37.8^\circ$  as keeping high resolution in the fovea. Moreover, the results of multi-resolution imaging experiments show that the system reduces the image resolution from the central field of view to the edge field of view gradually, and the amount of stitched image data with four-level resolution is reduced 17.2 times of data redundancy compared to the high-resolution image with total field of view.

**Key words:** Imaging system; Hybrid bionic imaging; Multi-resolution; Large field of view; Camera array; Curved surface

**OCIS Codes:** 110.2970; 110.4190; 040.1240; 350.5730; 220.4830; 120.2040

## 0 引言

视觉系统是人类获取外界环境信息的重要感知系统,视觉信息是人类活动中的重要信息来源之一.光电成像系统的应用拓宽了人类视觉信息来源,从微观的医用显微成像系统<sup>[1]</sup>至大规模大口径的深空遥感遥测系统<sup>[2]</sup>,发挥着不可替代的重要作用.但随着基础研究领域的飞速发展,传统的光学成像无法满足基础研究

基金项目:北京市自然科学基金(No.4182058)

第一作者:曹杰(1984—),男,副研究员,博士,主要研究方向为仿生视觉、三维成像. Email: caojie@bit.edu.cn

导师(通讯作者):郝群(1968—),女,教授,博士,主要研究方向为光电探测与成像. Email: qhao@bit.edu.cn

收稿日期:2019-10-31;录用日期:2020-02-01

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

的使用需求,较为典型的是对大视场(Field of View, FOV)、高分辨与实时性均有高要求的应用.如大范围搜索应用:在利用无人机机载侦察<sup>[3]</sup>时,需要同时考虑覆盖范围大、实时传输的需求,若要对全视场高分辨成像,则会产生大量冗余数据导致实时性变差;目标识别与追踪应用:在对空间大视场进行目标识别与追踪<sup>[4]</sup>时,为保证对目标高精度跟踪,需要对目标区域(即感兴趣区域)高分辨甚至超分辨成像,但传统大视场成像系统<sup>[5]</sup>的传感器因分辨率相同导致难以同时兼顾大视场与实时性.因此,需要通过图像压缩算法<sup>[6]</sup>来降低数据冗余,但会造成目标区域部分细节的丢失.由此可见,同时兼顾大视场、高分辨、实时性仍是光电成像亟待解决的问题.

随着对生物视觉的深入研究,研究者发现仿生视觉<sup>[7]</sup>成像技术可以为上述问题提供一种新的解决途径.一方面,从人眼视网膜感光细胞呈现的非均匀分布<sup>[8]</sup>(越靠近中央凹,感光细胞密集度越高,反之,感光细胞密集度越低)来看,模仿人眼在视觉感知过程中的信息处理机制<sup>[9]</sup>,可实现目标区域高分辨率、非目标区域低分辨率成像,从而有效地解决数据冗余的问题;另一方面,复眼<sup>[10]</sup>由成千上万的小眼构成,具有视场大、灵敏度高、结构紧凑等优势,通过模拟小眼的曲面排列方式,可实现大视场高分辨成像.

为此,本文从视觉仿生学出发,将两者优势结合,提出一种复合仿生成像方法,通过优化布局结构和多分辨率成像设计,构建了大视场、多分辨率的高效成像系统,从而有效解决传统光学成像在大视场、高分辨和快速成像方面难以兼顾的矛盾.

## 1 复合仿生成像系统总体设计

目前复合仿生成像系统的构建方式分为两种:微透镜阵列复眼系统<sup>[11]</sup>和相机阵列复眼系统<sup>[12]</sup>.基于相机阵列的复眼系统具有制备简单、分辨率高、光学像差小、设计灵活度高等优势,适宜在实验室条件下进行系统构建,所以本文采用相机阵列构建大视场多分辨率成像系统.

基于并列型复眼视觉原理<sup>[13]</sup>构建了大视场成像系统,该相机阵列结构中最外层是曲面镜头阵列,与镜头阵列相配合的是传感器阵列,其作用分别等同于并列型复眼中的角膜和感杆束;传感器与镜头一一对应,装调构成多相机阵列,相当于并列型复眼的多个子眼,整个相机阵列通过曲面支撑刚体进行固定与支撑.各个相机空间指向各不相同,每个相机对应一个物面视场且相邻相机之间存在视场重叠,相机对该视场内的物体进行光信号的捕获,由各自的传感器进行数字图像的采集;所有传感器捕获生成的图像数据被输入到图像处理模块进行图像的融合拼接处理,从而实现所有子眼视场覆盖下的大视场成像.

传统相机阵列复眼系统中所有镜头、传感器的参数是相同的,当需要对场景进行高分辨率成像时这种结构模式需要所有子眼相机都具备高分辨率,将导致整体数据量十分庞大<sup>[14]</sup>,从而导致数据处理冗余.

为了在保留高分辨率的同时降低冗余效果,受启发于人眼视网膜成像机理,提出了多分辨率成像的研究方法,通过对子眼相机镜头和传感器参数的非均一化处理,使得中心子眼视场具备高分辨率小视场特性,边缘子眼视场具备低分辨率大视场特性,如图1所示.此外,为了保证该方法图像处理的可行性,在从中心视场向边缘视场过渡的过程中,子眼模块的分辨率参数逐渐降低.这种多分辨率成像设计一方面降低了数据冗余,使得图像分辨率具有层次性、可选择性;另一方面通过多视场成像方式,相较于采用同参数的其他成像设计,减少了子眼模块数目,紧凑了系统的结构.

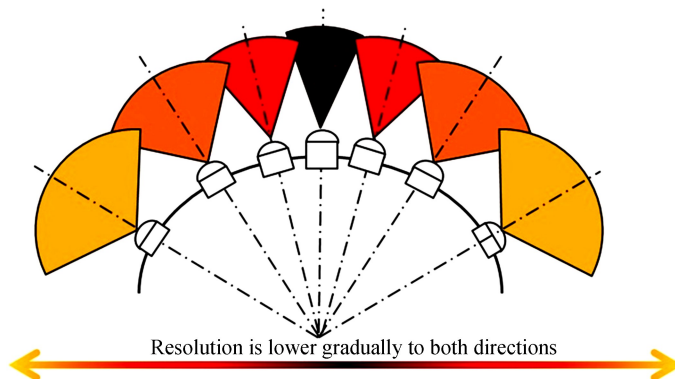


图1 大视场多分辨率复合仿生成像系统设计

Fig.1 The design of hybrid bionic imaging system with large FOV and multi-resolution

## 2 复合仿生成像系统实现

### 2.1 子眼相机布局与四级分辨率大视场成像实现

复合仿生成像系统共设有 11 个子眼模块,为了兼顾平面仿生复眼<sup>[15]</sup>高成像质量与球面仿生复眼<sup>[16]</sup>超大视场的特性,采取如图 2 所示的相机分布方式,主体布局方式为球面布局,但不同于传统球面复眼兼顾经纬两方向的大视场成像,该曲面布局方式只在经度上进行视场拓展,同时纬度上在中心相机周边以平面布局为辅助,以便在获得较大横向视场的同时减少柱面信息投影造成的图像畸变。

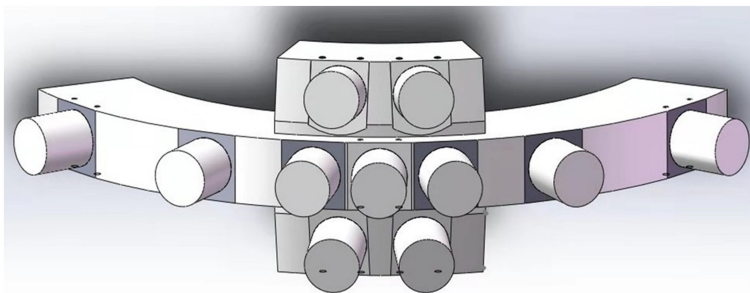


图 2 子眼相机曲面布局模型

Fig.2 The layout model of sub-eye cameras on a curved surface

由于本系统在保证大视场成像的同时又增加了多分辨率成像设计,为了确保系统获取尽可能大视场图像的同时处理更少的图像数据,系统成像设计分为四个等级,即最高分辨率-最小视场、次高分辨率-次小视场、次低分辨率-次大视场及最低分辨率-最大视场,且整个成像系统关于中心相机的中轴线对称,图 3 为采用与传感器形状相对应的矩形视场模型拼接而成的效果。

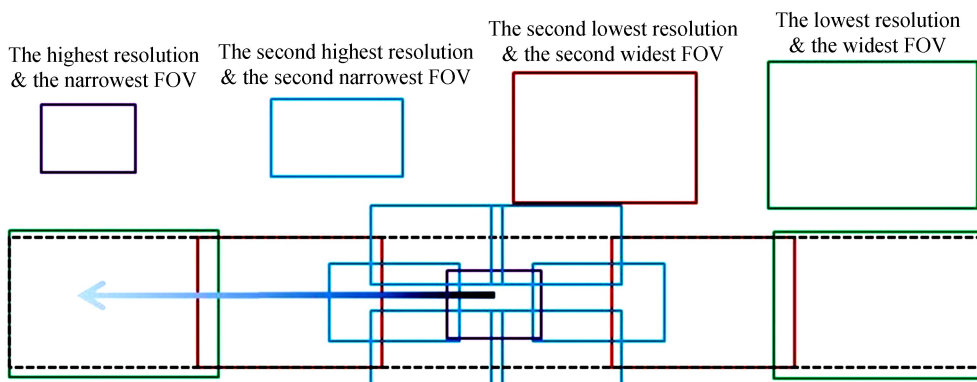


图 3 四级成像视场拼接示意图

Fig.3 The diagram of FOV stitching on the four-level imaging

### 2.2 子眼模块选型及整体系统实现

依据 2.1 节提出的四个等级成像设计要求及构建的子眼相机布局模型,以  $150^\circ$  的水平成像视场作为系统的设计目标参数,将 11 个子眼相机分为了 4 组拍摄模块,对应 4 级分辨率成像要求,并按照成像分辨率从高到低的顺序设为 1 至 4 级。为满足设计要求,通过对镜头的焦距、分辨率、视场及传感器的靶面尺寸、单像素尺寸等参数的分析,分别对四组拍摄模块的镜头和传感器进行了选型,如表 1 所示。

为保证子眼视场无缝拼接并尽量缩小相邻子眼视场的重合区域,借助视场拼接数学模型<sup>[14]</sup>,确定了相邻子眼的机械间隔和相邻子眼相机光轴的夹角,随后通过工程绘图软件 SolidWorks 设计了复眼外壳,用来固定和支撑子眼相机阵列,以构建复合仿生成像系统。

图 4 为成像系统的总体结构,整个系统分为 3 层,上下两层与中间层设置有  $8.5^\circ$  的倾角;中间层所有子眼相机位于同一个圆上,中间层从左往右的子眼相机编号为 1 到 7,以中心子眼相机为轴心,那么子眼相机 1 和 7 与中心子眼相机 4 的镜头轴线夹角为  $53^\circ$ ,子眼相机 2 和 6 与中心子眼相机 4 的镜头轴线夹角为  $27^\circ$ ,子眼相机 3 和 5 与中心子眼相机 4 的镜头轴线夹角为  $10^\circ$ ;该系统设计的总体视场可达到  $154.06^\circ \times 46.20^\circ$ 。

表 1 四组子眼拍摄模块的传感器和镜头参数

Table 1 Sensor and lens parameters for four sub-eye shooting modules

Sub-eye	Parameter	With 1 <sup>st</sup> resolution	With 2 <sup>nd</sup> resolution	With 3 <sup>rd</sup> resolution	With 4 <sup>th</sup> resolution
Sensor	Pixels	10 million	6.3 million	2 million	1.3 million
	Pixel size	1.67 $\mu\text{m}$	2.4 $\mu\text{m}$	4.5 $\mu\text{m}$	5.2 $\mu\text{m}$
	Chart size	1/2.3"	1/1.8"	1/1.8"	1/2"
Lens	Focal length	35 mm	25 mm	12 mm	12 mm
	Optical resolution	227.27 lp/mm	200 lp/mm	89.06 lp/mm	89.06 lp/mm
	Angle of view	22.9°×16.9°	24.6°×19.9°	40.4°×30.8°	40.4°×30.8°



图 4 多分辨率仿生复眼成像系统实物图

Fig.4 The multi-resolution bionic compound eye imaging system

### 3 系统成像实验及结果分析

#### 3.1 大视场成像实验及分析

##### 3.1.1 大视场成像实验

大视场成像实验是利用整个成像系统采集 11 幅图像,经柱面投影,借助 LOWE 提出的基于不变特征进行自动拼接全景图像的拼接算法<sup>[17-18]</sup>,通过提取 SIFT 特征并匹配、用 RANSAC 进行单应性估计、校正、增益补偿并进行多频段融合,以获得畸变较小的大视场拼接图像。

大视场成像实验分为室外与室内两种场景,室外实验选取视场范围内物距为 100 m 的场景,在外场搭建好实验平台,将仿生复眼成像系统数据输出端用 USB 数据线同计算机相连;数据采集之前调整各子眼相机的目标方位以防止各子眼视场内出现遮挡,同时将各子眼的光圈参数调成一致,并调整各子眼相机的像距,使其像面清晰;各子眼拍摄参数调整完成后,可通过计算机统一显示视场内的图像,并在同一时间捕获图像,随后进行图像拼接和修剪,图 5(a)~(d)为远场实验捕获的 4 级分辨率的部分图像,图 5(e)为 4 组图像进行图像拼接并对边缘不均匀成像部分进行图像剪裁后得到的大视场拼接图像。

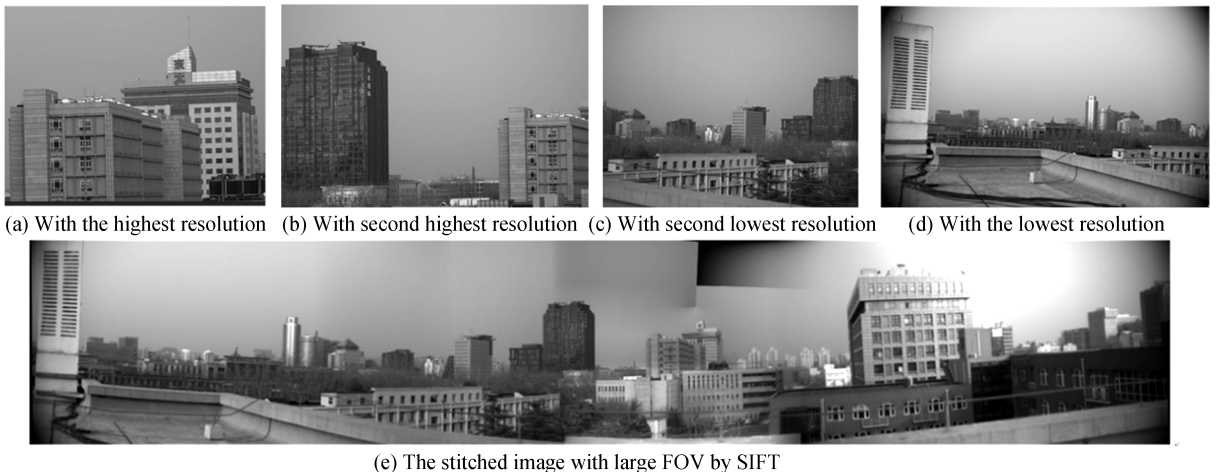


图 5 远场实验捕获的多级分辨率图像及拼接效果

Fig.5 Multi-resolution images and the stitched result on the far field experiment

室内场景实验选取视场范围内物距为 10 m 的场景, 在室内搭建好实验平台, 采用同室外相同方式对室内场景进行图像拍摄, 其捕获的多级分辨率图像及拼接效果如图 6 所示。

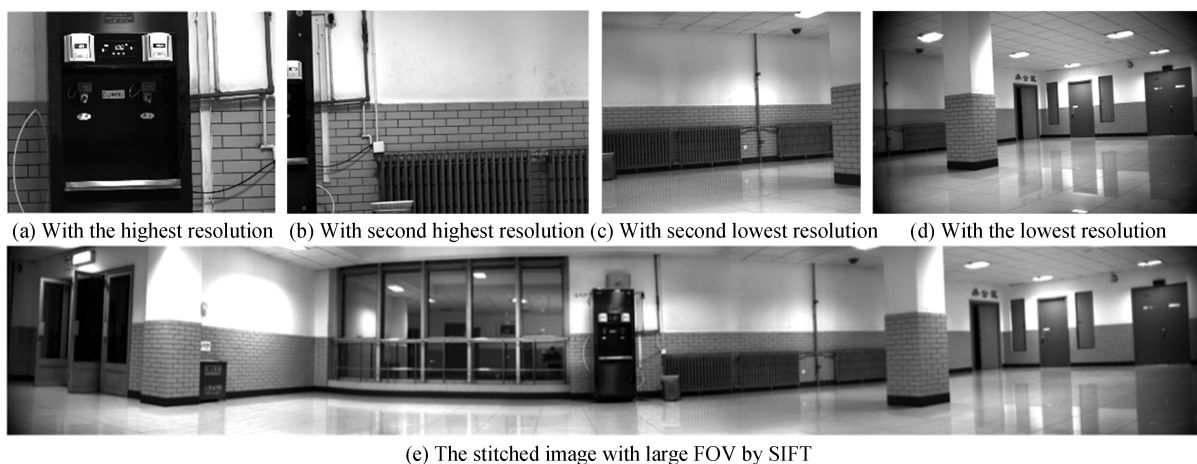


图 6 近场实验捕获的多级分辨率图像及拼接效果

Fig.6 Multi-resolution images and the stitched result on the near field experiment

### 3.1.2 结果分析

通过实验测量得到系统中心相机的实际视场为  $9.7^\circ \times 7.3^\circ$ , 图像拼接后原始视场为  $152.6^\circ \times 44.8^\circ$ , 剪裁后的视场为  $150.8^\circ \times 37.8^\circ$ , 三者视场对比如图 7 所示, 其中红色框选的视场范围是裁剪后的结果。

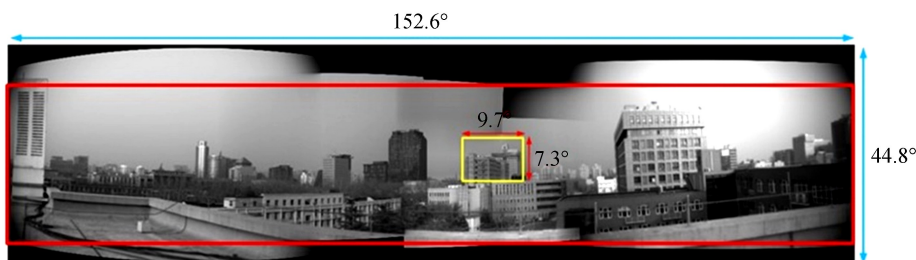


图 7 中心视场和总视场的对比

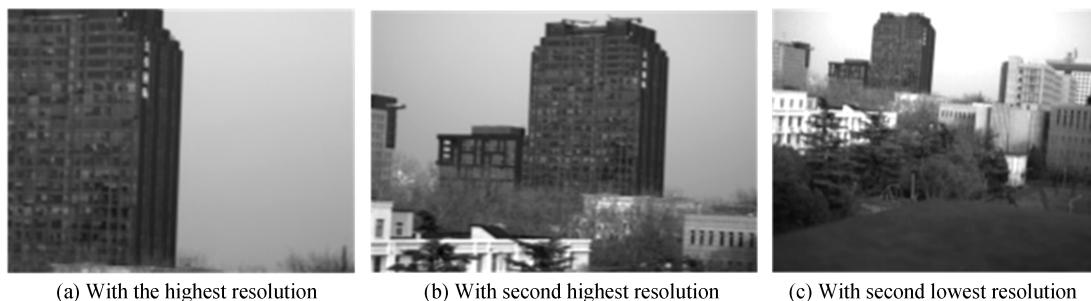
Fig.7 Comparison between the central FOV and the total FOV

通过实验对比, 成像系统的水平视场相对于中心子眼相机水平视场拓宽了 15.7 倍, 垂直视场拓宽了 6.1 倍, 整体视场范围相当于扩宽中心镜头的 95.8 倍, 这充分说明该结构方式对于视场扩大具有显著效果. 通过对比剪裁前后的拼接图像视场发现, 该系统成像水平视场与初始设定水平视场略有减小, 但仍达到  $150^\circ$  水平视场的指标; 而裁剪后的垂直视场有少许降低, 这与各子眼相机视场分配水平线不一致有关。

## 3.2 多分辨率成像实验及分析

### 3.2.1 多分辨率成像实验

多分辨率成像实验主要通过不同分辨率相机对同一场景细节目标成像, 系统相机分辨率分为 4 级, 且外侧的第 3 级与第 4 级分辨率极为相近, 因此实验采用前 3 级相机进行多分辨率成像实验. 实验中先将第 1 级相机固定于室外搭建的实验平台, 调整相机指向、光圈值、像面清晰后对目标进行图像捕获; 之后再第 2 级相机固定于相同的位置且调整为相同的拍摄参数, 对相同目标进行捕获; 第 3 级相机重复与上述相同的步



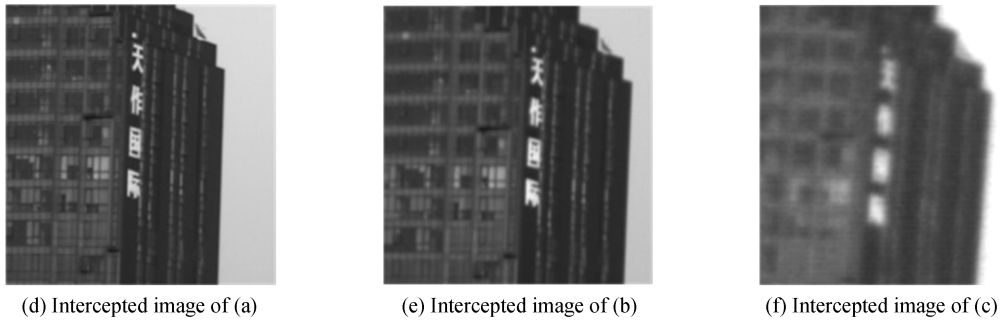


图8 多分辨率成像实验图像

Fig.8 Images on the multi-resolution imaging experiment

骤.图像捕获成功后将捕获的图像调整为相同放大率后并截取相同的目标区域,捕获图像如图8(a)~(c)所示,截取图8(a)~(c)的相同部分的图像如图8(d)~(f)所示.

### 3.2.2 结果分析

系统多分辨率成像分析从两方面进行:大视场拼接图像多分辨率显示分析和同一目标下不同级分辨率成像差异分析.同一目标场景下不同级别分辨率的相机成像如图8(a)~(c)所示.由于不同级别分辨率相机视场不同,对于同一场景成像时相机放大倍率不同,可以看到视场越大图像放大率越小.将三幅图片调整为目标相同放大倍率,如图8(d)~(f)所示,可以观察到从左至右图像分辨率逐渐降低且同一目标也从清晰向模糊转变.

大视场拼接图像多分辨率显示如图9所示,从图中看到,不论近景大视场成像还是远景大视场成像,以同样的放大率放大处于图像中心区域(系统中心相机视场范围)的目标细节可以清晰显示,处于图像边缘(系统边缘相机视场范围)的目标则处于模糊状态,且图像从中心向边缘过渡的过程中可以明显看到图像清晰向模糊转变的变化规律,同时不同分辨率相机的视场重叠区域可以明显观察到不同分辨率的过渡交界.

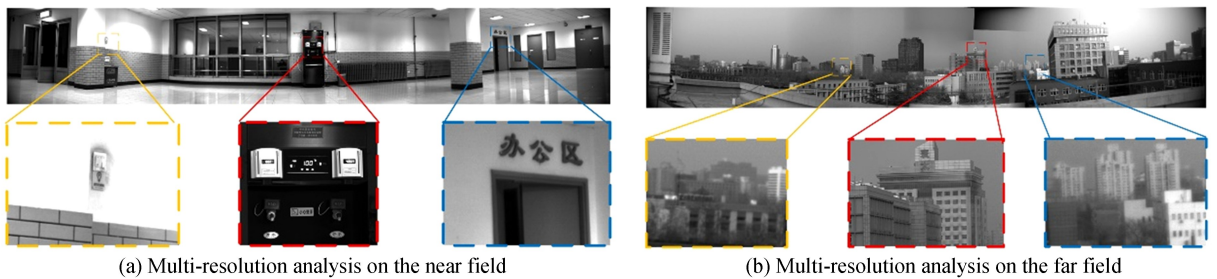


图9 大视场拼接图像多分辨率显示分析

Fig.9 Analysis of multi-resolution imaging on the large FOV stitched image

通过大视场拼接图像多分辨率显示分析与同一目标下不同级分辨率成像差异分析,充分说明该系统在进行大视场成像的同时具备了视场范围内多目标的多分辨率成像,具有中心分辨率高边缘分辨率低逐渐过渡的特性.这种多分辨率成像特性在计算机图像数据处理上体现为系统整体数据处理量相较于高分辨率大视场图像下的数据量的差异.经计算,该系统各相机的单帧拼接图像需传输约5 554万的像素量,若相同视场下分辨率为中心清晰成像相机的拼接图像需传输95 652万的像素量,此系统相较于中心清晰全视场成像在传输数据量上减小了17.2倍.

由于系统的多级相机变分辨率成像设计,通过对该系统的分辨率分析与相应的传输数据量分析,该系统在极大减少传输数据量的同时可以完成大视场高分辨率成像,达到较为理想的多分辨率成像效果.

## 4 结论

本文研究了一种曲面相机阵列多分辨成像方法,设计了一种复合仿生成像系统,实现了中间视场高分辨率、边缘视场低分辨率的四级分辨率成像,且总视场达到 $150.8^{\circ} \times 37.8^{\circ}$ ,具备了大视场多分辨率成像特性.该成像系统减少了17.2倍的数据冗余量,使其同时兼顾大视场、高分辨、高效性的成像优势.

## 参考文献

- [1] LI Qiao, GAO Chang-lei, CHEN Xiao-dong, *et al.* Design of OCT endoscopic imaging system based on rotating scanning probe[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10):2650-2653.  
李乔, 高长磊, 陈晓冬, 等. 基于旋转扫描探头的 OCT 内窥成像系统设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(10):2650-2653.
- [2] JIAO Jian-chao, SU Yun, CHEN Xiao-li. Prospect of intelligent remote sensing technique in deep space exploration[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, **33**(5):33-38.  
焦建超, 苏云, 陈晓丽. 深空探测智能遥感技术展望[J]. 航天返回与遥感, 2012, **33**(5):33-38.
- [3] ZHU Yun, HAN Gen-jia. Present situation and prospect on UAV electro-optical detection technology[J]. *Ship Science and Technology*, 2004, **26**(6): 51-55.  
朱耘, 韩根甲. 无人机光电探测技术的现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2004, **26**(6): 51-55.
- [4] KANG Wei, ZENG Han-song, ZHAO Yi. Insect-Human Hybrid Eye (IHHE): an adaptive optofluidic lens combining the structural characteristics of insect and human eyes[J]. *Lab on a Chip*, 2014, **14**(18): 3594-3602.
- [5] HOU Xi-bao, BAI Ting-zhu. Research on large field of view imaging system using multi-sensor array and key technologies[J]. *Optical Technology*, 2013, **39**(3): 276-279.  
侯喜报, 白廷柱. 多传感器大视场成像系统设计及关键技术研究[J]. 光学技术, 2013, **39**(3): 276-279.
- [6] WANG Ming-wei, HAN Yu, ZHANG Bo, *et al.* A review on image compression algorithm[J]. *Space Electronic Technology*, 2016, **13**(2):35-43.  
王明伟, 韩宇, 张波等. 图像压缩算法发展概述[J]. 空间电子技术, 2016, **13**(2):35-43.
- [7] CHENG Zhi-jun, XIE Shao-rong. State of the art and trend of ocular bionics[J]. *Mechanical Engineer*, 2010, (4): 24-27.  
程志君, 谢少荣. 视觉仿生学研究现状及展望[J]. 机械工程师, 2010, (4): 24-27.
- [8] ZHANG Yang. Research on structure principle and key technologies of visual properties for bionic eye[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.  
张阳. 仿人眼的结构原理和关键视觉技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [9] ZHENG Yong, LIU Da-cheng. Production monitoring image processing based on foveated vision[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, **45**(2): 258-261.  
郑勇, 刘大成. 基于视网膜中央凹视觉的生产监控图像处理方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, **45**(2): 258-261.
- [10] VIOLLET S, GODIOT S, LEITEL R, *et al.* Hardware architecture and cutting-edge assembly process of a tiny curved compound eye[J]. *Sensors*, 2014: **14**(11):21702-21721.
- [11] HAO Qun, MENG Ling-tong, CHENG Yang, *et al.* Design of a retina-like transmitting system based on a curved lens array[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(29): 8494-8502.
- [12] VENKATARAMAN K, LELESCU D, DUPARRÉ, J, *et al.* PiCam: an ultra-thin high performance monolithic camera array[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2013, **32**(6):1-13.
- [13] XU Yan, YAN Shu-hua, ZHOU Chun-lei, *et al.* Advances in bionic study on insects' compound eyes[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(S1):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**(S1):10-12.
- [14] GAO Tian-yuan, DONG Zheng-chao, ZHAO Yu, *et al.* Structure and alignment of field stitching compound eye optical imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 43-48.  
高天元, 董正超, 赵宇, 等. 视场拼接复眼成像系统结构及装调方法[J]. 光子学报, 2014, **43**(11): 43-48.
- [15] GAO Yuan. Spatial resolution enhancement technology of flat compound-eye imaging systems[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Science, 2015.  
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.
- [16] ZHANG Hao. Multi-channel information infusion of spherical compound eye[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.  
张浩. 球面复眼多通道信息融合[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [17] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2):91-110.
- [18] BROWN M, LOWE DG. Automatic panoramic image stitching using invariant features[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, **74**(1):59-73.