

doi: 10.3788/gzxb20144305.0510005

大视场复眼结构图像处理算法研究

曹阿秀^{1,2}, 史立芳², 石瑞英¹, 邓启凌², 杜春雷³

(1 四川大学 物理科学与技术学院 微电子学系, 成都 610064)

(2 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(3 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122)

摘 要:针对多维子眼成像通道曲面排布组成的大视场复眼结构,提出了一种切割-旋转-映射的图像处理算法来实现多通道图像的大视场拼接.通过确定复眼结构的排布特征,分析了各成像通道捕获的子眼图像之间的相互关系,去除相邻子眼图像之间的冗余部分,并运用几何光学及成像光学原理,研究了子眼图像与三维映射空间之间的关系,从而实现了二维子眼图像在三维空间的大视场拼接.实验制备了包含 37 个镜头且视场角可达 118°的人工复眼结构,并运用提出的图像处理算法处理制备的复眼结构捕获的子眼图像.结果表明:算法处理图像过程中不损失图像的分辨率,可以有效地实现多通道图像的大视场拼接,且获得的图像可视性强,满足实用化要求,可进一步推进曲面复眼成像系统的应用.

关键词:多通道成像;复眼;大视场;图像处理;机器视觉;阵列化;光学设计与制备

中图分类号:Q692; TP391

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)05-0510005-6

Image Processing Algorithm Study of Large FOV Compound Eye Structure

CAO A-xiu^{1,2}, SHI Li-fang², SHI Rui-ying¹, DENG Qi-ling², DU Chun-lei³

(1 *Microelectronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

(2 *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(3 *Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122, China*)

Abstract: For the large field of view compound eye structure with multi-dimensional sub-eye imaging channels arranged on a curve surface, the segmentation-rotation-projection image processing algorithm was presented to realize a large field of view synthesized of multi-channels. By confirming the arrangement characteristics of the compound eye structure, the relation among all sub-eye images captured by corresponding imaging channels was analyzed and the overlap regions between nearby sub-eye images were eliminated. Meanwhile, by using the principle of geometrical optics and imaging optics, the relation between the sub-eye images and the three-dimensional projection space was studied to achieve the large field of view of two-dimensional sub-eye images synthesized in a three-dimensional space. An artificial compound eye consisted of 37 lenses with field of view over 118 degrees was fabricated and the corresponding sub-eye images captured by the fabricated compound eye structure were processed based on the presented algorithm. The results show that the resolution of the sub-eye images can be ensured of no decrease during the image processing procedure and the algorithm can effectively realise a large field of view synthesized of multi-channel images meeting the practical requirements with high visual effect. All of the above studies could put forward the application of the compound eye imaging system.

Key words: Multiple imaging; Compound eye; Large field of view; Image processing; Machine vision; Arrays; Optical design and fabrication

OCIS Codes: 110.4190; 110.2970; 100.6890; 220.4830

基金项目:中科院支撑项目(No. A11K030)和“西部之光”资助

第一作者:曹阿秀(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为光学成像及图像处理. Email: longazure@163.com

导师(通讯作者):石瑞英(1963-),女,教授,博导,主要研究方向为半导体器件及其辐照效应. Email: ruiyshi@scu.edu.cn

收稿日期:2013-08-08;录用日期:2013-11-25

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

0 引言

随着光学成像系统在生物、工业和国防等领域的广泛应用^[1-6],人们对其系统性能的要求越来越高.其中成像系统的视场(Field of View, FOV)角作为光学探测系统的重要指标,其范围亟待扩大.传统单通道成像结构是采用复杂的折/衍混合系统^[7-8]来增大视场角,该结构包含的光学玻璃材料价格昂贵,加工非常困难,且结构中的二级光谱难以校正,制约其成像质量,难以满足大视场成像结构设计的要求.因此,如何利用新型成像结构来获得视场角的突破成为人们研究的热点.

受昆虫复眼全方位探测性能的启发,科学家们提出了人工复眼成像系统^[9-12],系统利用列阵化排布的子眼镜头模拟昆虫的小眼形成多通道成像结构以获得大视场成像.近几年,国内外很多研究小组都开展了人工复眼成像系统的相关研究^[13-22].由于微光学加工工艺水平的限制,大视场的曲面微透镜列阵的面形难以精确控制,造成其成像质量差、分辨率低,难以实用化.而采用子眼镜头列阵化曲面排布的三维立体大视场复眼结构的制备和装配更易实现,且获得的图像能够满足图像分辨率高、信息量大、形变小等要求,所以对其相应曲面排布特征的图像处理算法的研究成为推进曲面复眼成像系统实际应用的必要环节.

本文旨在推进大视场复眼成像系统的实用化,针对曲面列阵化排布的大视场复眼结构,提出了基于曲面拼接的图像处理算法.重点分析复眼成像结构的多维成像通道的排布特征,研究各通道采集的二维图像与三维空间之间的关系,去除相邻子眼成像通道捕获的子眼图像间的冗余部分,实现二维子眼图像在三维映射空间的大视场无死区拼接.

1 大视场复眼结构成像原理

图1为大视场复眼结构成像原理图.其中,复眼结构由多个子眼成像通道和曲面支撑体组成,每个子眼

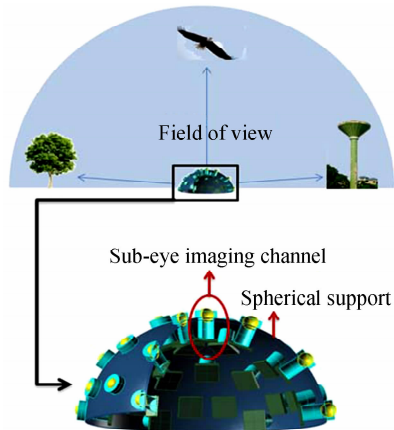


图1 大视场复眼结构成像原理

Fig. 1 The imaging principle of the large FOV compound eye

成像通道由镜头和图像传感器组成,并按照主光轴向心的位置排布在曲面支撑体上.由于子眼成像通道曲面排布的特征,各子眼成像通道可对不同方向视场内的物体进行成像,处于其视场内的目标物会被相应的子眼成像通道捕获形成独立的子眼图像.相邻子眼成像通道的视场之间存在重叠区域,以保证相邻子眼成像通道间的无死区覆盖探测.在实现多维子眼成像通道大视场拼接时,需要分析和研究复眼结构的多通道排布特征,对相应的子眼图像进行处理和拼接.在该成像结构中,子眼成像通道的曲面排布特征以及各子眼成像通道所采集图像的数据处理是实现该结构的关键.

2 大视场复眼结构的排布特征

为了实现图1中多维成像通道复眼结构的大视场拼接,基于Rhino 4.0软件平台,以由37个排布在曲面上的子眼成像通道组成的大视场复眼结构为例,对其多通道排布特征进行分析和研究.整体复眼结构如图2.

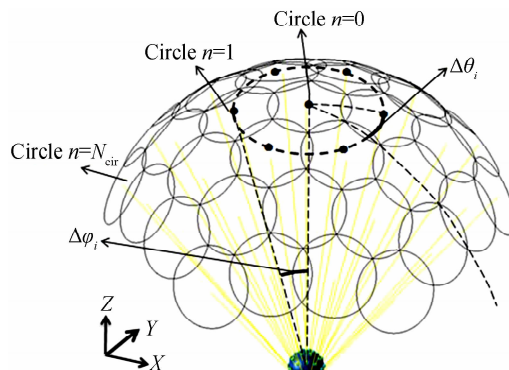


图2 复眼结构

Fig. 2 Compound eye structure

图2中圆形区域表示单个子眼成像通道的视场情况,采用圈数 $n(0 \leq n \leq N_{cir})$ 来标定整个复眼结构的成像通道,可见复眼结构由 $N_{cir} + 1$ 圈成像通道组成.设计复眼结构的 N_{cir} 取值为3,单个子眼成像通道的视场角标定为 24° ,为了避免后续过程中的组装误差,预留充足的容余区域,以免拼接过程中生成死区,经过计算,取镜头的视场角为 22.4° ,以达到后期实现拼接方案时图像的像素级配准.当 $n=0$ 时,复眼结构的中心排列1个成像通道;当 $n=1$ 时,将中心成像通道绕Y轴旋转相应的角度,再以Z轴为旋转轴在 360° 范围内实现项目数为6的阵列化操作.旋转和阵列化之后成像通道与X、Z轴的夹角分别为 $\Delta\theta_i$ 和 $\Delta\phi_i$,共排列6个(其中 i 为相应圈数内对应的成像通道, i 取字母A~R);以此类推,当 $n=2$ 时,排列12个成像通道;当 $n=3$ 时排列18个成像通道.整体复眼结构由37个排布在曲面上的子眼成像通道组成,视场角可达 118° .

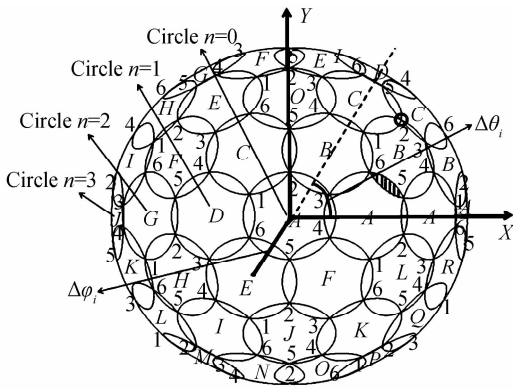


图3 复眼结构的视场俯视图

Fig. 3 The FOV planform of the compound eye structure

复眼结构视场俯视图如图3,图中相应圈数内子眼成像通道的标定方式由字母A~R标定;斜线举例标出相邻视场的重叠区域;圆圈举例标出相邻成像通道视场的交点,通过数字1~6来标定相应圈数内相邻成像通道的交点位置。

整体复眼结构设计遵循相邻子眼成像通道视场交于一点的原则,充分利用每个通道的有效视场形成整体大视场复眼结构的无死区覆盖探测.根据复眼结构的设计原则,计算子眼成像通道的旋转角度,从而获得各个子眼成像通道与X轴的夹角 $\Delta\theta_i$ 和Z轴的夹角 $\Delta\varphi_i$,如表1.

表1 各个子眼成像通道与X、Z轴的夹角
The angles between the sub-eye imaging channels and X or Z axis

n	0						1						2						
i	A	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
$\Delta\theta/^\circ$	0	0	60	120	180	240	300	0	30	60	90	120	150	0	19.16	40.84	60	79.16	100.84
$\Delta\varphi/^\circ$	0	19.46	19.46	19.46	19.46	19.46	19.46	39.45	34.028	39.45	34.028	39.45	34.028	60.34	52.9	52.9	60.34	52.9	52.9
n	2						3												
i	G	H	I	J	K	L	A	B	C	D	E	F							
$\Delta\theta/^\circ$	180	210	240	270	300	330	0	19.16	40.84	60	79.16	100.84							
$\Delta\varphi/^\circ$	39.45	34.028	39.45	34.028	39.45	34.028	60.34	52.9	52.9	60.34	52.9	52.9							
n	3						3												
i	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R							
$\Delta\theta/^\circ$	120	139.16	160.84	180	199.16	220.84	240	259.16	280.84	300	319.16	340.84							
$\Delta\varphi/^\circ$	60.34	52.9	52.9	60.34	52.9	52.9	60.34	52.9	52.9	60.34	52.9	52.9							

3 图像处理—切割-旋转-映射法

由于大视场复眼结构是由排布在曲面上的列阵化子眼成像通道组成,在图像处理和拼接时,需要考虑子眼成像通道的排布、视场等影响因素.同时,针对多维成像复眼结构的多通道排布特征,相应需要处理的图像数目多,且处理过程中涉及图像的空间转化,这对如何实现所有通道子眼图像拼接的图像处理算法提出很高要求.

根据复眼结构多成像通道曲面排布的特征,提出切割-旋转-映射法来处理该复眼成像结构所捕获的子眼图像,从而实现子眼图像的大视场拼接.

仿真基于3ds Max平台,其所选场景如图4,根据设计的37眼复眼结构的成像通道排布特征,实现相应子眼图像的捕获.图5为37个子眼成像通道所捕获的37幅原始子眼图像.

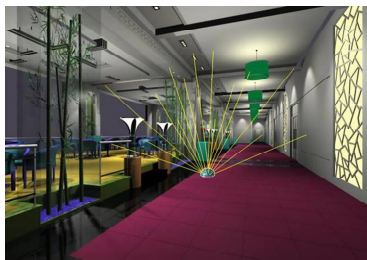


图4 场景图

Fig. 4 The selected scene

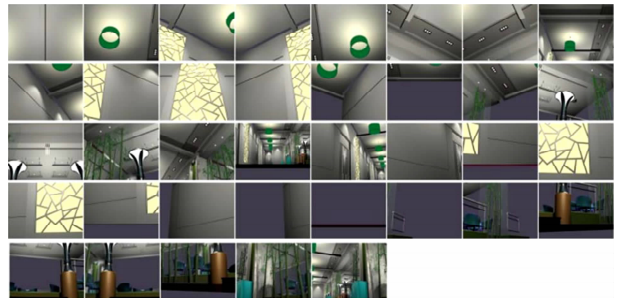


图5 37幅子眼图像

Fig. 5 The 37 sub-images

对各子眼成像通道所捕获的子眼图像进行切割,以去除各子眼成像通道视场之间重叠部分产生的图像冗余.根据光学成像原理,子眼成像通道的视场分布情况与其像场分布情况类似,存在着比例关系,所以可以通过分析复眼成像结构中各子眼成像通道视场的分布情况来分析其相应的像场情况.根据相邻成像通道视场之间的排布关系,基于子眼成像通道的旋转角度和排布方式,计算出相邻视场之间的交点坐标.再根据交点坐标值,编写程序对所有通道的原始图像进行切割,切割按照交点坐标首尾相连接形成的多边形形状,保留对应通道多边形内的场景,去除边缘冗余部分.

由于组成复眼成像结构的子眼成像通道在排布时

经过了旋转操作,图像传感器作为其组成部分,靶面的方向将存在一定的旋转角度.因此,在图像投影拼接之前,需要将切割后的图像按照子眼成像通道的三维空间分布情况,根据靶面的旋转角度进行旋转,切割和旋转之后的图像如图 6.

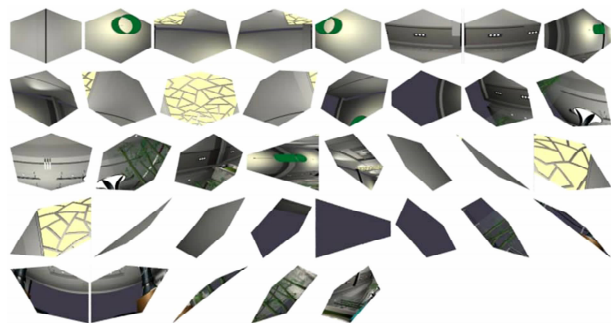


图 6 剪切和旋转后的子眼图像

Fig. 6 The sub-images after segmentation and rotation

根据相应子眼成像通道的三维空间位置,编写程序将旋转后的图像映射到相应位置完成大视场拼接,拼接之后的图像如图 7.

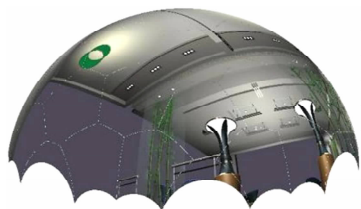


图 7 大视场拼接图

Fig. 7 The synthesized image with large FOV

4 实验

为了对提出的图像处理算法进行验证,根据复眼结构的具体排布方式,实际制备了一个 37 镜头、视场角可达 118°的大视场复眼成像结构,并将提出的图像处理算法应用到该结构中实现大视场成像.

采用精密仪器制备技术制备的曲面复眼结构如图 8.整个大视场复眼成像结构由曲面支撑体和 37 个子眼镜头组装而成,镜头的外观直径约为 16 mm.设计在

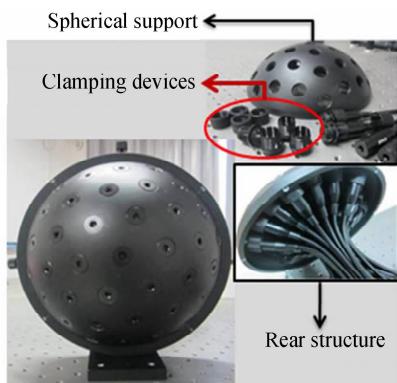


图 8 复眼结构制备结果

Fig. 8 The preparation results of the compound eye structure

曲面支撑体的不同方位打孔来安装子眼镜头,穿孔位置由子眼镜头的排布方式确定,经精密设备加工打孔而成.根据子眼镜头规格,孔的直径 Φ 确定为 16 mm,一共打有 37 个孔.利用箝位装置将每个子眼镜头固定在球面支撑体上形成一个完整的曲面复眼结构.

在安装镜头时,对每一个镜头 CCD 靶面的方向和位置进行校正,以满足精度要求.镜头焦距为 12 mm,视场角为 24°,角分辨率为 3.5×10^{-4} rad; CCD 靶面大小为 6.8×5.1 mm²,像素大小为 4.25 μ m,像素数为 1600 \times 1200.

对图 9 中 22.4°的圆形有效视场区域进行处理.一幅原始图像的像素大小为 1600 \times 1200,其最小边长像素的一半为 600,假设探测距离为 h ,像素校正误差为 41.其中 X 可由式(1)和(2)获得.

$$\tan 12^\circ = 600/h \tag{1}$$

$$\tan 11.2^\circ = X/h \tag{2}$$

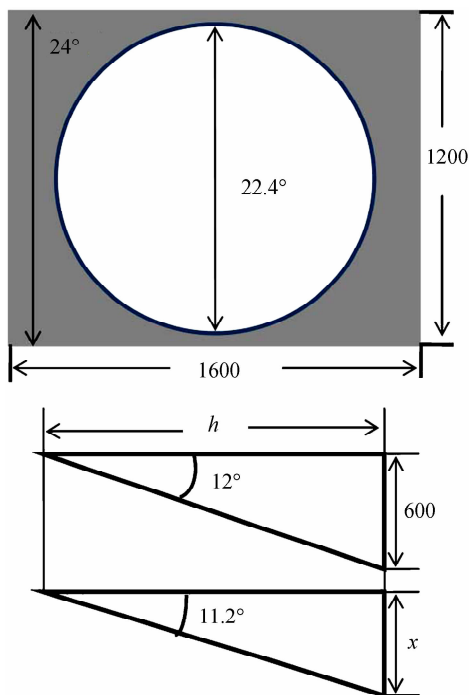


图 9 有效视场区域

Fig. 9 The effective area of FOV

因此,在预留 Δ pixel 像素校正误差的情况下,可通过算法对每个成像通道的误差进行校准,然后实现拼接方案,达到像素级匹配.综合 37 个曲面阵列化排布镜头的视场,在保证不损失角分辨率的情况下,实现视场角为 118°的大视场探测.

在实验室环境下,对该结构的成像效果进行验证,连通制备的复眼结构对实验室场景进行图像捕获,利用提出的切割-旋转-映射法对多通道的子眼图像进行处理和拼接.

在对子眼图像进行切割之前,需要计算出相邻视场间的交点坐标.该交点坐标是由子眼镜头的排布方

式决定,根据其具体的旋转角度和阵列化方式,计算出交点坐标值.其中,中心子镜头与第一圈子镜头6个交点的坐标值如表2.

表2 交点坐标

Table2 The coordinate values of the intersection points

Circle $n=0$	1	2	3	4	5	6
X	-1.715	0	1.715	1.715	0	-1.715
Y	0.99	1.98	0.99	-0.99	-1.98	-0.99
Z	10	10	10	10	10	10

根据所有子镜头视场相交所成的交点的三维空间坐标,将原始子眼图像进行切割.并将切割后的图像进行旋转和映射拼接,最终获得了一幅映射在曲面上的大视场拼接图如图10.

实验结果表明,设计和制备的复眼结构的视场角可达 118° ,角分辨率为 3.5×10^{-4} rad.利用切割-旋转-映射法可以有效地处理和拼接多通道复眼成像结构捕获的图像.算法在处理多通道图像时,不降低图像的分辨率,保证了图像的清晰度,进一步推进了复眼成像系统的实际应用.

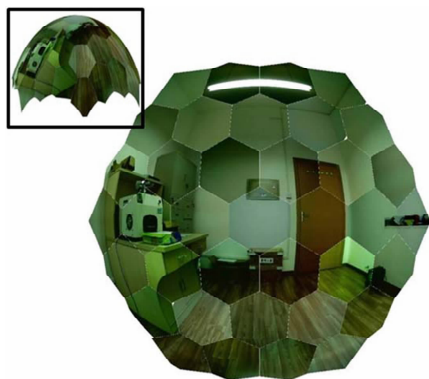


图10 映射在曲面上的大视场拼接图

Fig.10 The panorama of the entire scene projected on a curving surface

5 结论

本文提出切割-旋转-映射法来实现大视场复眼结构多通道图像的拼接.基于设计的曲面复眼结构开展验证实验,实验表明利用切割-旋转-映射法可以有效地实现复眼系统多通道图像的大视场无死区拼接;该算法可以应用于任意一个曲面阵列化排布的复眼结构,实现其多通道图像的拼接.

参考文献

[1] BOAS D A, DALE A M, FRANCESCHINI M A. Diffuse optical imaging of brain activation: approaches to optimizing image sensitivity, resolution, and accuracy[J]. *NeuroImage*, 2004, **23**: S275-S288.

[2] YAO Bao-li, LEI Ming, XUE Bin, *et al.* Progress and applications of high-resolution and super-resolution optical imaging in space and biology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1607-1618.

姚保利,雷铭,薛彬,等.高分辨和超分辨光学成像技术在空间和生物中的应用[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1607-1618.

[3] SANCEY L, DUFORT S, JOSSERAND V, *et al.* Drug development in oncology assisted by noninvasive optical imaging[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2009, **379**: 309-316.

[4] PENG Xiao-dong, LIU Bo, MENG Xin. Research on romete sensing image generation modeling in the visible regions[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1106-1111.

彭晓东,刘波,孟新.星载可见光相机成像仿真建模研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1106-1111.

[5] HU G, YAO J, BAI J. Full-angle optical imaging of near-infrared fluorescent probes implanted in small animals[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, **18**: 707-711.

[6] LI Hong-zhuang, ZHANG Zhen-duo, LIU Xin-yue, *et al.* Optical design of a wide spectral fish-eye lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1312-1316.

李宏壮,张振铎,刘欣悦,等.一款宽光谱鱼眼镜头的设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1312-1316.

[7] FLORES A, WANG M R, YANG J. Achromatic hybrid refractive - diffractive lens with extended depth of focus[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(30): 5618-5630.

[8] HE Li-qing, WU Hai-sheng. Optical design of hybrid reflective/ diffractive system in large field[J]. *Laser Journal*, 1999, **20**(5): 15-16.

贺莉清,吴海生.大视场折/衍混合系统光学设计[J]. *激光杂志*, 1999, **20**(5): 15-16.

[9] LENG Xue, NA Jie. Structure and function of insect compound eyes[J]. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science)*, 2009, **27**(2): 241-244.

冷雪,那杰.昆虫复眼的结构和功能[J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2009, **27**(2): 241-244.

[10] XU Yan, YAN Shu-hua, ZHOU Chun-lei, *et al.* Advances in bionic study on insects. compound eyes [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(S): 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**(S): 10-12.

[11] DI Si, XU Hong-kui, DU Ru-xu. New progress of artificial compound eye imaging systems[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(4): 93-96.

邸思,徐洪奎,杜如虚.人造复眼成像系统研究的新进展[J]. *光学与光电技术*, 2008, **6**(4): 93-96.

[12] NAKAMURA T, HORISAKI R, TANIDA J. Computational superposition compound eye imaging for extended depth-of-field and field-of-view[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(25): 27482-27495.

[13] CAO A-xiu, SHI Li-fang, SHI Rui-ying, *et al.* Image process technique used in a large FOV compound eye imaging system [C]. SPIE, 2012, **8558**:1-8.

[14] LIU Yan, SHI Li-fang, SHI Rui-ying, *et al.* An artificial compound eye system for large field imaging proc[C]. SPIE, 2012, **8558**:1-6.

[15] LI Lei, ALLEN Y. Design and fabrication of a freeform microlens array for a compact large-field-of-view compound-eye camera[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(12): 1843-1852.

[16] SHI Li-fang, CAO A-xiu, LIU Yan, *et al.* Design and experiments of artificial compound eye with large view field [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, **40**(7):27-33.

史立芳,曹阿秀,刘艳,等.大视场人工复眼结构设计方法与实验[J]. *光电工程*, 2012, **51**(12): 1843-1852.

[17] SONG Y M, XIE Yi-zhu, MALYARCHUK V, *et al.* Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye [J].

- Nature*, 2013, **497**: 95-99.
- [18] SHI Li-fang, YE Yu-tang, DENG Qi-ling, *et al.* Method to fabricate artificial compound eye[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(9):2462-2466.
史立芳,叶玉堂,邓启凌,等. 制备人工复眼结构的方法[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(9):2462-2466.
- [19] CAI Meng-ying, XU Gui-li. Fast bionic image mosaic method on large field of view[J]. *Transducer and Micro System Technologies*, 2007, **26**(12): 82-84.
蔡梦颖,徐贵力. 仿蝇复眼视觉系统中大视场图像的拼接[J]. 传感器与微系统, 2007, **26**(12): 82-84.
- [20] GUO Fang, WANG Ke-yi, YAN Pei-zheng, *et al.* Calibration of compound eye system for target positioning with large field of view [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(5): 913-920.
郭方,王克逸,闫佩正,等. 用于大视场目标定位的复眼系统标定[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(5): 913-920.
- [21] ZHANG Hong-xin, LU Zhen-wu, Li Feng-you, *et al.* The building and analysis of the superposition compound eye's optical model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1106-1109.
张红鑫,卢振武,李凤有,等. 重叠复眼光学模型的建立与分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 1106-1109.
- [22] YOSHINORI A, SHOGENJI R, NORIMICHI T, *et al.* Efficient gonio-imaging of optically variable devices by compound-eye image-capturing system[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(4): 3353-3362.