

引用格式: 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):0911004

许黄蓉,刘晋亨,张远杰,等. 无人机载型曲面仿生复眼成像测速系统[J]. 光子学报, 2021, 50(9):0911004

## 无人机载型曲面仿生复眼成像测速系统

许黄蓉<sup>1,2</sup>, 刘晋亨<sup>1,2</sup>, 张远杰<sup>1,2</sup>, 武登山<sup>1</sup>, 樊豪<sup>1,2</sup>, 冯向朋<sup>1</sup>, 张耿<sup>1,2</sup>,  
胡炳樑<sup>1,2</sup>, 鱼卫星<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 西安 710072)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于仿生复眼的视觉优势, 将曲面仿生复眼结构应用于无人机载光电探测系统, 实现机载宽视场高分辨运动目标探测。根据生物复眼的结构形态, 设计了六边形排列的曲面透镜阵列作为曲面仿生复眼, 辅以光学中继转像子系统和 CMOS 图像传感器, 构成曲面仿生复眼成像测速系统。该系统的成像视场可达  $98^\circ \times 98^\circ$ , 系统焦距为 5 mm, 角分辨率为 1.8 mrad,  $F$  数为 3.5, 系统体积为  $\Phi 123 \text{ mm} \times 195 \text{ mm}$ , 重量为 1.35 kg。根据仿生复眼的成像原理, 利用仿生复眼成像系统中相邻小眼存在的视场重叠优势, 提出了曲面仿生复眼的测速原理, 使得多个小眼能够同时探测场景中的同一个目标。运动汽车的测速实验表明该测速方法能够有效提高运动目标测试的可靠性和准确性。

**关键词:** 仿生复眼; 成像系统; 无人机载; 大视场; 测速系统

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215009.0911004

## UAV-borne Biomimetic Curved Compound-eye Imaging System for Velocity Measurement

XU Huangrong<sup>1,2</sup>, LIU Jinheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuanjie<sup>1,2</sup>, WU Dengshan<sup>1</sup>, FAN Hao<sup>1,2</sup>,  
FENG Xiangpeng<sup>1</sup>, ZHANG Geng<sup>1,2</sup>, HU Bingliang<sup>1,2</sup>, YU Weixing<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710072, China)

(2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the visual advantages of the biomimetic compound eye, the biomimetic curved compound-eye is applied to the unmanned aerial vehicle-borne photoelectric detection system to realize the airborne wide field-of-view and high-resolution detection of moving objects purposes. According to the characteristics of the biological compound eye, a lens array arranged on the curved surface in a hexagon is designed as compound-eye lens, combined with an optical relay subsystem and a CMOS image sensor to form a biomimetic curved compound-eye imaging and velocity measurement system. The developed biomimetic curved compound-eye imaging system has a field of view of  $98^\circ \times 98^\circ$ , a system focal length of 5 mm, an angular resolution of 1.8 mrad and an  $F$ -number of 3.5. The size of the system is  $\Phi 123 \text{ mm} \times 195 \text{ mm}$ , and the weight is 1.35 kg. According to the imaging principle of the biomimetic compound-eye and by taking advantage of the overlapping field of views between adjacent ommatidia, the velocity measurement principle of the biomimetic curved compound-eye is proposed. The velocity measurement

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61975231, 61475156)

第一作者: 许黄蓉(1991—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为仿生复眼的光学设计。Email: hrxu4221@163.com

导师(通讯作者): 鱼卫星(1975—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光谱成像、仿生光学及微纳光学。Email: yuwx@opt.ac.cn

收稿日期: 2021-04-08; 录用日期: 2021-05-24

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

experiment of a moving car shows that the velocity measurement method can effectively improve the test reliability and accuracy of the moving target.

**Key words:** Biomimetic compound-eye; Imaging system; UAV-borne; Large field of view; Velocity measurement system

**OCIS Codes:** 110.4234; 170.0110; 330.4150; 220.4830

## 0 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)光电类载荷广泛应用于侦察预警、安全巡视以及跟踪定位各个领域,光学成像系统作为无人机的眼睛,能够获取更多外界环境的信息<sup>[1-3]</sup>。系统视场宽能够探测广阔的观测范围,分辨率高能够解析物体更多的细节信息,而对于宽视场、高分辨率、长焦距的光学成像设备,无人机能够提供给光学成像设备的空间位置和重量非常有限,因此进一步扩展视场,提高空间分辨率,减小系统体积、重量和功耗是无人机载型设备的发展方向<sup>[4-5]</sup>。

目前研究者们已经探索发展出许多兼顾宽视场与高分辨的成像方式,典型代表有相机阵列分布技术、鱼镜头以及曲面仿生复眼技术<sup>[6-9]</sup>。美国杜克大学研究小组提出了同心多尺度成像技术,从2009年到2015年先后研制出AWARE-2、AWARE-10、AWARE-40等系统,这些系统都是由镜头阵列和探测器阵列组成,系统视场角 $100^\circ \times 60^\circ$ 对应的像元分辨率可达 $26.3 \mu\text{rad}$ ,视场角 $36^\circ$ 对应的像元分辨率可达 $10.8 \mu\text{rad}$ <sup>[10-13]</sup>。相机阵列通过多个镜头可以采集到高分辨率图像,通过视场拼接可获得广阔的视场信息,但是这种组合方式使得系统体积更加庞大、不易携带,对使用场合要求较高,并且该种特殊的成像方式需要多个探测器分别采集相应子镜头的子图像,很难保证数据采集的同步性和实时性。单纯通过引入鱼镜头也可以扩展,但是其成像在边缘视场存在较大畸变,使得像面分辨率不一致,尤其是图像边缘信息损失较大<sup>[14]</sup>。2017年,中国科学技术大学研究人员研制了由排列在球面上的14个摄像机组成的曲面仿生复眼,可将视场扩展到 $80^\circ$ ,体积小、集成度高,但是该复眼设备同样存在数据采集同步性的问题<sup>[15]</sup>。为了满足小型无人机载荷需求以及实现远距离广域目标探测,本文研制了一款大视场曲面仿生复眼成像测速系统,并应用于无人机载光电探测系统,在一定程度上解决大视场、高分辨率成像以及数据采集同步性和实时性之间的矛盾。

## 1 曲面仿生复眼成像测速系统

曲面仿生复眼成像系统的焦距 $f'$ 由式(1)确定。

$$\frac{f'}{a} = \frac{H}{\theta} \quad (1)$$

式中, $H$ 为无人机的航拍高度, $\theta$ 为地元分辨率, $a$ 为应用中的像元尺寸。根据设计指标要求,无人机载复眼成像系统的飞行高度 $H=500 \text{ m}$ ,地元分辨率 $\theta=1 \text{ m}$ ,所选图像传感器像元尺寸为 $4.5 \mu\text{m}$ ,在本应用中将 $2 \times 2$ 像元合并,则式(1)中的像元尺寸 $a=9 \mu\text{m}$ 。由此计算出曲面仿生复眼成像系统焦距满足 $f' \geq 4.5 \text{ mm}$ 即可。

设计的曲面仿生复眼成像测速系统的整体结构如图1(a)所示,由复眼镜头、光学中继转像子系统和大面阵的图像传感器组成。其中复眼镜头包括透镜阵列和支撑球壳,支撑球壳上加工了数百个阶梯通孔以安装透镜阵列,相邻通孔之间有一定间隔以防止光线串扰,相邻小眼之间存在一定的视场重叠以保证物场景空间同一目标可被系统从不同角度同时探测,使得最终记录在图像传感器上不仅有图像信息,还有深度信息。透镜阵列排列在曲面上用以扩展视场,而光学中继转像子系统是由8片透镜组成,如图2所示,其焦距为 $14.4 \text{ mm}$ ,物面为半径 $68 \text{ mm}$ 的球面, $F$ 数为 $3.5$ ,光学系统总长为 $114 \text{ mm}$ ,所选透镜材料均为价格便宜、容易加工的光学材料。该子系统有效解决了透镜阵列形成的曲面像面与平面图像传感器不匹配的问题,其结合复眼镜头大大提高了仿生复眼的空间分辨率和探测距离。同时该曲面仿生复眼成像系统只采用一块图像传感器对所有小眼进行数据采集,不存在采集同步性的问题。

图1(b)为集成的曲面仿生复眼成像系统原型。在集成过程中,用柔性环氧树脂薄珠密封,以防止水分和灰尘进入复眼系统。采用垫片精密调节半球形壳体与光学中继转像子系统之间的距离,并利用法兰连接两个子系统,进一步保证了装置的密封性、可靠性与稳定性。六边形排列的127个小透镜捕获到图像的视场

约为  $98^\circ \times 98^\circ$ , 焦距为 5 mm, 角分辨率为 1.8 mrad, 系统体积为  $\Phi 123 \text{ mm} \times 195 \text{ mm}$ , 支撑球壳材料采用航空铝材 7075, 焦面组件结构支撑部分采用镁铝合金, 系统总重量为 1.35 kg, 具体设计过程参考文献<sup>[9]</sup>。

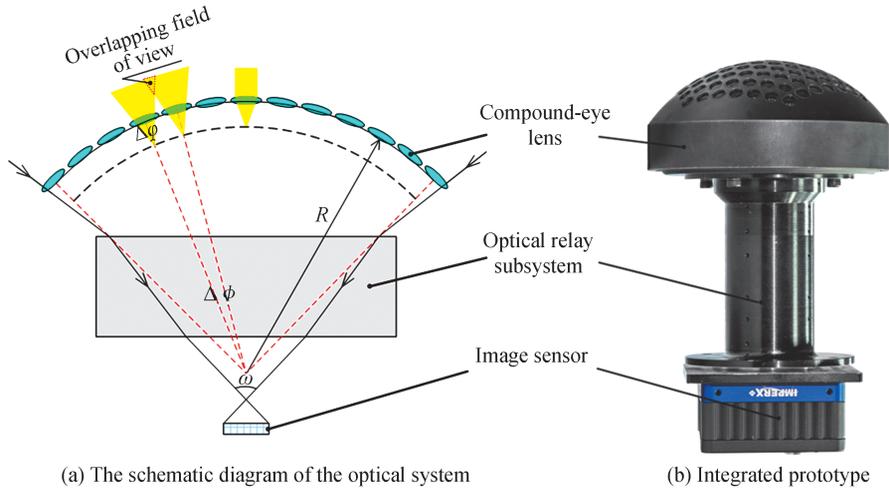


图 1 曲面仿生复眼成像系统  
Fig. 1 The biomimetic curved compound-eye imaging system

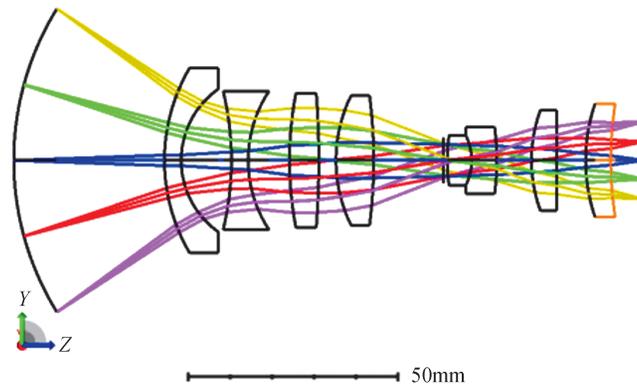


图 2 光学中继转像子系统光路  
Fig. 2 The layout of the optical relay subsystem

## 2 机载型曲面仿生复眼测速原理

设计的曲面仿生复眼成像系统最终捕获到的原始图像是由 127 个小眼所对应的子图像组成, 这些子图像由一块图像传感器同时进行数据采集, 因此不涉及数据采集的同步性问题。每个子图像是正立的像, 而整个画面中各子图像的位置则错位分布, 由于相邻小眼之间存在视场重叠, 故相邻的 7 个小眼可同时获取到同一被测目标的位置信息。曲面仿生复眼成像测速原理如图 3 所示, 以小眼 C1\_1 为中心, 周围 6 个小眼 C2\_1、C2\_2、C2\_3、C2\_4、C2\_5 和 C2\_6 可同时场景对同一个运动目标进行定位与测速。假设目标  $P$  在世界坐标系  $o-xyz$  中的坐标位置为  $P(x, y, z)$ , 运动距离  $L$  后的坐标位置为  $P'(x', y', z')$ , 以每个小眼的中心建立成像系统坐标系  $O-X_{ij}Y_{ij}Z_{ij}$ , 每个小眼对应的子图像所在坐标系为  $o-u_{ij}v_{ij}$ , 其中  $i=1, 2, j=1, 2 \dots 6$ 。由于每两个相邻小眼存在视场重叠, 因此在像素坐标系  $o-u_{ij}v_{ij}$  中  $v$  方向均存在像素重叠, 假设重叠像素为  $\Delta v$ , 已知每个像元尺寸为  $p$ , 则  $P$  与  $P'$  图像之间的距离  $l$  为

$$l = p \sqrt{(u_{ij} - u'_{ij})^2 + (v_{ij} - \Delta v - v'_{ij})^2} \quad (2)$$

运动目标的速度为

$$V = \frac{lD}{f'T} \quad (3)$$

式中,  $T$  为运动时间,  $D$  为拍摄距离。由于该曲面仿生复眼成像系统中每 7 个小眼可同时探测到场景中的同

一个目标,因此,针对运动目标的每个位置均存在7组位置关系,可通过取平均值的方法来提高探测精度。

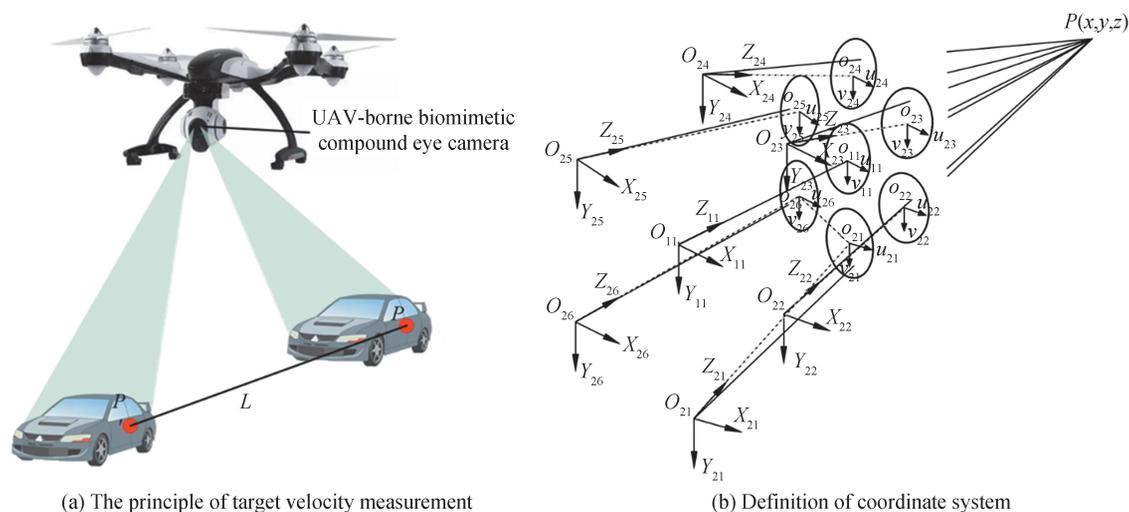


图3 曲面仿生复眼成像系统测速原理

Fig. 3 The principle of target velocity measurement for the biomimetic curved compound-eye imaging system

### 3 机载型曲面仿生复眼测速实验

实验中,曲面仿生复眼成像系统搭载在无人机的云台上,如图4所示,分别对行驶在双向8车道的第6、5车道中的汽车进行拍摄。该无人机的拍摄距离分别为17 m、14 m,汽车上标记棋盘格每个格子的尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,汽车保持 $5.56\text{ m/s}$  ( $20\text{ km/h}$ )的速度匀速行驶。图5(a)、(b)分别为拍摄距离17 m、14 m处的复眼融合图像,可以看出所设计的曲面仿生复眼成像系统具有良好的成像效果。其中对于图5(a),汽车从点 $P$ 运动到点 $P'$ ,采集了46帧图片,采集过程中汽车共经过了9个小眼,这样以点 $P$ 对应的第一个小眼为起始点,则存在8次视场重叠区域。同样地,对于图5(b)中汽车从点 $P$ 运动到点 $P'$ 采集的42帧图片共经过了10个小眼,则存在9次视场重叠区域。而图像的采样速率为10 fps,因此,两次实验的采样时间 $T$ 分别为4.6 s、4.2 s。



图4 搭载曲面仿生复眼成像系统的无人机

Fig. 4 UAV equipped with biomimetic curved compound-eye imaging system

通过对感兴趣区域采用角点检测找出目标所在子图像的像素位置以及通过相邻子图像的特征匹配计算出其重叠区域的像素数目,数据的处理过程均在采集的原始复眼图像上完成,从而提高了运动目标的实时探测能力。图6(a)、(b)分别为拍摄距离为17 m时汽车在复眼图像中的起始、终止位置。以图6(a)中点 $P$ 所在小眼 $C_0$ 对应的子图像为计算起始点,与其相邻小眼 $C_1$ 的重叠像素数目 $\Delta v_1 = 60$ , $C_1$ 与其相邻小眼的重叠

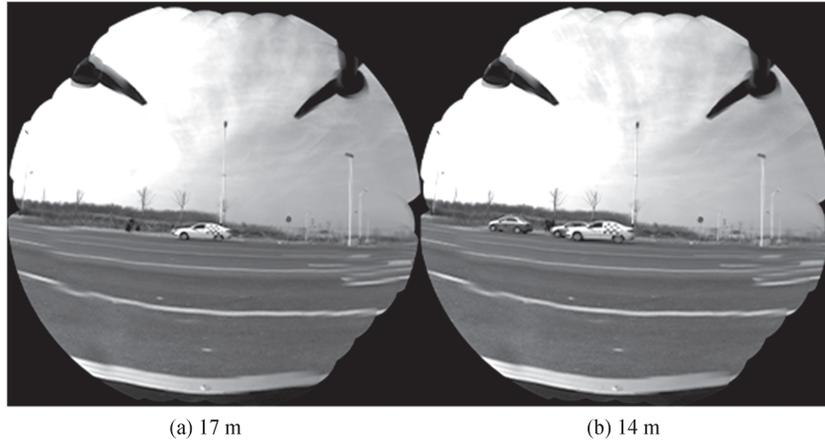


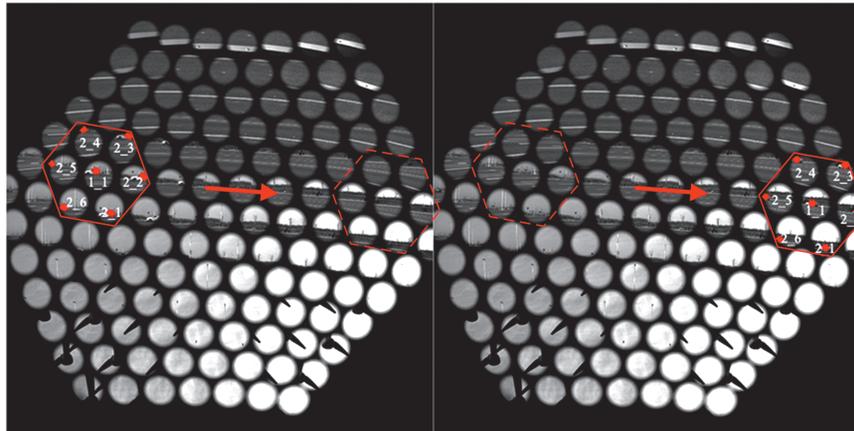
图5 不同拍摄距离处曲面仿生复眼成像系统的融合图像

Fig. 5 The retrieved images of the biomimetic curved compound-eye imaging system at different distance

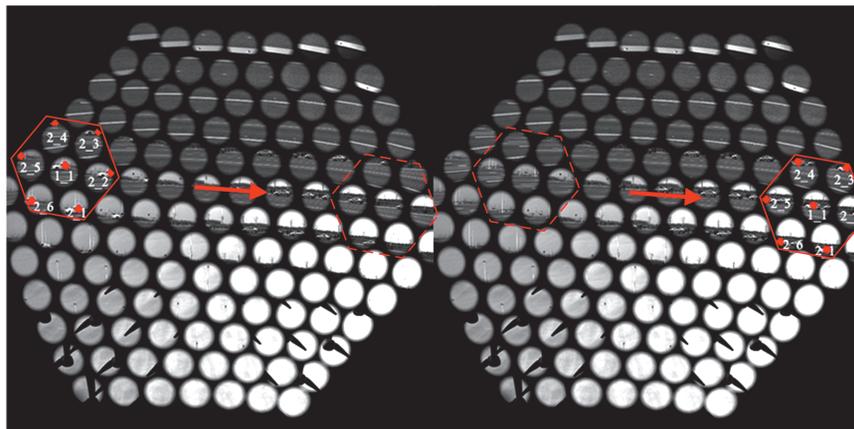
像素数目  $\Delta v_2 = 227$ , 图 6(b) 中点  $P'$  所在小眼  $C_0$  对应的子图像与其相邻小眼的重叠像素数目  $\Delta v_3 = 24$ , 每相邻子图像之间的无图像区域像素数目  $\Delta v_4 = 39$ , 因此可计算出当拍摄距离为 17 m 时, 每相邻两个小眼的重叠像素数以及无图像区域的像素之和为

$$\Delta v = \Delta v_1 + 6\Delta v_2 + \Delta v_3 + 8\Delta v_4 = 1758 \quad (4)$$

图 6(c)、(d) 分别为拍摄距离为 14 m 时汽车在复眼图像中的起始、终止位置。按照相同的计算原理可获得拍摄距离 14 m 处相邻小眼对应子图像的重叠区域以及无图像区域像素之和为



(a) Starting position of the moving car at a distance of 17 m (b) Ending position of the moving car at a distance of 17 m



(c) Starting position of the moving car at a distance of 14 m (d) Ending position of the moving car at a distance of 14 m

图6 曲面仿生复眼成像系统测速过程

Fig. 6 Velocity measurement process of biomimetic curved compound-eye imaging system

$$\Delta v = \Delta v_1 + 7\Delta v_2 + \Delta v_3 + 9\Delta v_4 = 2007 \quad (5)$$

式中,  $\Delta v_1 = 61, \Delta v_2 = 227, \Delta v_3 = 8, \Delta v_4 = 45$ 。

在曲面仿生复眼成像系统采集运动汽车过程中可以得到多幅复眼图像,图6只给出了部分图像。根据图6中的复眼图像,汽车运动中的两个位置 $P$ 和 $P'$ 相对应的共14个像素坐标分别记录在14个子图像中,通过图像处理得到的像素坐标如表1所示。

表1 不同拍摄距离处目标位置 $P$ 和 $P'$ 对应的像素坐标

Table 1 The pixel coordinates corresponding to the target positions  $P$  and  $P'$  at different shooting distances

Test location	No. of ommatidium	Pixel coordinates ( $u_i, v_i$ )	
		$D=17$ m	$D=14$ m
$P$	0	(3 100, 1 098)	(3 188, 690)
	1	(3 029, 1 659)	(3 097, 1 240)
	2	(3 521, 1 484)	(3 600, 1 086)
	3	(3 607, 945)	(3 711, 562)
	4	(3 190, 551)	(3 300, 157)
	5	(2 670, 709)	(2 761, 290)
	6	(2 599, 1 273)	(2 669, 848)
$P'$	0	(2 725, 4 550)	(2 727, 4 536)
	1	(2 626, 5 117)	(2 628, 5 105)
	2	(3 175, 4 945)	(3 175, 4 932)
	3	(3 245, 4 362)	(3 245, 4 349)
	4	(2 800, 3 976)	(2 801, 3 964)
	5	(2 294, 4 151)	(2 295, 4 138)
	6	(2 197, 4 706)	(2 199, 4 694)

根据表1中的像素坐标,结合式(2)、(3)可计算出汽车的平均速度以及相对误差如表2所示。从表2中的测试数据可以看出,通过对7个小眼的测试速度求平均值使误差更稳定,在拍摄距离为17 m处,汽车运动速度的相对误差控制在了4%以内,因此,曲面仿生复眼成像系统具有良好的远距离测速性能。

表2 不同拍摄距离处测试速度与实际速度的对比

Table 2 Comparison of test speed and actual speed at different test distances

Test distance	Velocity measurement values $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$							Mean velocity/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Actual velocity/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Relative error/%
	$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$			
17 m	5.77	5.81	5.78	5.65	5.70	5.74	5.73	5.74	5.56	3.24
14 m	5.75	5.66	5.52	5.60	5.70	5.70	5.66	5.66	5.56	1.80

## 4 结论

本文研制的无人机载型曲面仿生复眼成像测速系统,一定程度上解决了现有大视场高分辨成像与数据采集同步性、实时性之间的矛盾,实现了广域监测运动目标的功能。从运动汽车的测速结果分析可以看出,曲面排列的透镜阵列可实现7个相邻小眼同时识别与分辨运动目标,通过求平均值可获得较小的误差。该曲面仿生复眼成像系统结构紧凑、重量小、功耗小,并且系统只采用一块图像传感器,故而不存在数据采集的同步性问题,同时图像处理过程直接在原始图像上进行,大大提高了运动目标的实时探测能力,因此该系统在机载相机广域预警探测、安全监控等领域可广泛应用。

### 参考文献

- [1] XUE Qingsheng, HUANG Yu, LIN Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 240-245.  
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 240-245.
- [2] LEI Weining, GUO Yunzhi, GAO Tingting. Study on the structure of large field of view detection system based on bionic

- compound eye[J]. Optics Optoelectronic Technology, 2016, 14(3): 62-66.
- 雷卫宁,郭云芝,高挺挺. 基于仿生复眼的大视场探测系统结构研究[J]. 光学与光电技术, 2016, 14(3): 62-66.
- [3] GUO Shuji, SHI Lifang, CAO Axiu, et al. Study of large field of view compound-eye orientation technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(5): 0512003.
- 郭书基,史立芳,曹阿秀,等. 基于大视场人工复眼定位技术[J]. 光子学报, 2016, 45(5): 0512003.
- [4] ZHU H B, ZHANG Y J, ZHU D L, et al. Design of high resolution objective on small UAV[J]. Electro-optic Technology Application, 2016, 31(3): 5-8.
- [5] MEI Gui, ZHAI Yan, MIAO Jianyu, et al. Design of a high resolution and wide field space infrared optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222004.
- 梅贵,翟岩,苗健宇,等. 空间高分辨率宽视场红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(12):1222004.
- [6] BRADY D J, GEHM M E, STACK R A, et al. Multiscale gigapixel photography[J]. Nature, 2012, 486(7403): 386-389.
- [7] WU Xiongxiang, WANG Xiaorui, GUO Bingtao, et al. Analysis on detection capability of airborne optoelectronic system based on monocentric multiscale imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0422001.
- 吴雄雄,王晓蕊,郭冰涛,等. 基于同心多尺度成像的机载光电系统探测能力分析[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0422001.
- [8] YANG T, LIU Y, MU Q, et al. Compact compound-eye imaging module based on the diffractive microlens array for biometric fringerprint capturing[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7513-7522.
- [9] XU H, ZHANG Y, YU W, et al. Biomimetic curved compound-eye camera with a high resolution for the detection of distant moving objects[J]. Optics Letters, 2020, 45(24): 6863-6866.
- [10] HUI S, JOHNSON A, STACK R A, et al. Optomechanical design of multiscale gigapixel digital camera[J]. Applied Optics, 2013, 52(8): 1541-1549.
- [11] YOUN S H, SON H S, MARKS D L, et al. Optical performance test and validation of microcameras in multiscale, gigapixel images[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3712-3723.
- [12] MARKS D L, LLULL P R, PHILLIPS Z, et al. Characterization of the AWARE 10 two-gigapixel wide-field-of-view visible imager[J]. Applied Optics, 2014, 53(13): C54-C63.
- [13] LLULL P R, BANGE L, PHILLIPS Z, et al. Characterization of the AWARE 40 wide-field-of-view visible imager[J]. Optica, 2015, 2(12): 1086-1089.
- [14] YAN Aqi, YANG Jianfeng, CAO Jianzhong, et al. Optical system design of space fisheye camera[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 188-191.
- 闫阿奇,杨建峰,曹剑中,等. 航天鱼眼相机光学系统设计的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 188-191.
- [15] WANG Y, CAI B, LU Y, et al. Optical system design of artificial compound eye based on field stitching[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2017, 59(6):1277-1279.