



曲面仿生复眼测速技术研究

刘韬 郭文阁 朱帅民 张远杰 许黄蓉 武登山 周晓军 鱼卫星

Velocity measurement technology of curved bionic compound eye

LIU Tao, GUO Wenge, ZHU Shuaimin, ZHANG Yuanjie, XU Huangrong, WU Dengshan, ZHOU Xiaojun, YU Weixing

引用本文:

刘韬,郭文阁,朱帅民,等.曲面仿生复眼测速技术研究[J].*应用光学*,2024,45(1):134-141. DOI: 10.5768/JAO202445.0103001

LIU Tao, GUO Wenge, ZHU Shuaimin, et al. Velocity measurement technology of curved bionic compound eye[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(1): 134-141. DOI: 10.5768/JAO202445.0103001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0103001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复眼式光学成像系统畸变测量与校正技术研究

Distortion measurement and correction method on compound-eye optical imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 717-722 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403004>

混合仿生鱼眼-复眼的广角高清成像系统

Biomimetic hybrid fisheye/compound eye imaging system with wide view and high resolution

应用光学. 2019, 40(2): 311-315 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205002>

基于目标运动的复眼式双目视觉测距法

Compound eye binocular vision ranging method based on target motion

应用光学. 2020, 41(3): 571-579 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303005>

水下仿生偏振成像光学系统设计

Design of underwater bionic polarization imaging optical system

应用光学. 2019, 40(5): 717-722 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0501001>

水下仿生偏振成像光学系统设计

Design of underwater bionic polarization imaging optical system

应用光学. 2019, 40(5): 717-722 [https://doi.org/https://doi.org/\\${suggestArticle.doi}](https://doi.org/https://doi.org/${suggestArticle.doi})

基于液体透镜的仿生视觉光学成像系统

Optical imaging system in bionic vision based on liquid lens

应用光学. 2018, 39(5): 595-599 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0134-08

曲面仿生复眼测速技术研究

刘 稔¹, 郭文阁¹, 朱帅民¹, 张远杰^{2,3}, 许黄蓉³, 武登山^{2,3}, 周晓军², 鱼卫星^{2,3}

(1. 西安石油大学 理学院, 陕西 西安 710065; 2. 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, 陕西 西安 710072; 3. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049)

摘要: 曲面仿生复眼相机具有大视场, 对运动目标敏感等特点, 在广域探测、内窥导管、精确制导等国防、医学及民用工业领域中有着广阔的应用前景, 该文报道了基于曲面仿生复眼相机的高速运动目标测速技术研究。首先建立了基于曲面仿生复眼成像原理的测速模型; 然后利用霍夫圆检测算法在原始复眼图像上找出每个子眼所在位置, 并通过图像分割对相邻子眼之间重叠视场进行分析; 最后再结合 SIFT 算法对相邻 2 个子眼的子图像进行特征点提取与图像配准, 由提取出的特征点像素坐标计算出重叠区域像素数目, 从而得到汽车的运动速度。设计了相关测速实验进行验证, 实验中拍摄距离控制在 6 m~10 m 之间, 对以 8.33 m/s 速度做匀速直线运动的汽车进行测试, 测试结果表明, 可将速度测试的相对误差控制在 4% 以内。与单孔径成像系统测速结果相比, 曲面仿生复眼测速技术具有更高的准确性和重复性。

关键词: 仿生复眼; 单孔径; 测速系统; 图像处理; 大视场

中图分类号: TN206; TP391

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0103001](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0103001)

Velocity measurement technology of curved bionic compound eye

LIU Tao¹, GUO Wenge¹, ZHU Shuaimin¹, ZHANG Yuanjie^{2,3}, XU Huangrong³,
WU Dengshan^{2,3}, ZHOU Xiaojun², YU Weixing^{2,3}

(1. College of Science, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China; 2. 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; 3. College of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The curved bionic compound eye camera has the characteristics of large field of view and sensitivity to moving objects, and has broad application prospects in the fields of national defense, medicine and civil industry, such as wide-area detection, endoscopic catheter, precision guidance, etc. The research on velocity measurement technology of high-speed moving target based on the curved bionic compound eye camera was reported. Firstly, a velocity measurement model based on the principle of curved bionic compound eye imaging was established, then the position of each sub-eye was found on the original compound eye image by using the Hoff circle detection algorithm, and the overlapping field of view between adjacent sub-eyes was analyzed by image segmentation. Finally, the sub-images of the two adjacent sub-eyes were extracted and matched with the SIFT algorithm, and the number of pixels in the overlapping area was calculated from the pixel coordinates of the extracted feature points, so as to get the moving speed of the car. Further, the relevant velocity measurement experiment was designed to verify. In the experiment, the shooting distance was controlled between 6 m and 10 m. The velocity test was carried out on the vehicle moving in a uniform straight line at a speed of 8.33 m/s. The test results show that the relative error of the velocity test can be controlled within 4%.

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-04-13

基金项目: 国家自然科学基金 (61975231; 61475156); 西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划 (YCS21213263)

作者简介: 刘韬 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事曲面仿生复眼测速相关技术研究。E-mail: 936233159@qq.com

通信作者: 鱼卫星 (1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光谱成像、仿生光学及微纳光学研究。E-mail: yuwx@opt.ac.cn

Compared with the velocity measurement results of single aperture imaging system, the curved bionic compound eye velocity measurement technology has higher accuracy and repeatability.

Key words: bionic compound eye; single aperture; velocity measurement system; image processing; large field of view

引言

基于视觉成像的传统测速主要以单目测速和双目测速为主, 利用视频测速技术记录运动目标在运动位置上的变化以及所用时间, 从而计算出目标的运动速度。2013年, 林柏林通过对路面标定和车辆特征识别实现了单目视觉对道路车辆的测速功能^[1], 但是该测速系统存在安装方式单一、道路标定困难以及场景要求高等弊端。东北大学常子霆^[2]在单目视觉测速的基础上, 结合一种空间位置的匹配区域对齐算法和基于模板匹配的空间位移计算方法, 实现了基于双目视觉测速的功能, 实验上验证了运动目标速度控制在10 km/h~20 km/h的速度测试, 误差控制在5%以内。

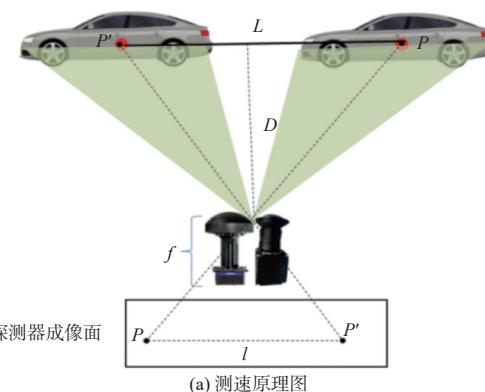
近几十年来, 不少学者对仿生复眼相机成像技术进行了不断探索, 并利用仿生复眼的成像优势, 不断探索发掘实质性的应用^[3-8]。在曲面仿生复眼相机良好的成像效果基础上, 为了突显对运动目标敏感的视觉优势, 利用曲面仿生复眼相机实现对高速运动目标测速的相关研究也得到了重视。2017年, 西安光机所鱼卫星团队研制了一种小型曲面仿生复眼系统, 结合每个子眼不同视角的成像原理, 对不同子眼测速分量进行分析, 提出利用速度分量计算目标实际速度的方法^[9]。2020年, 该课题组研制出一款长工作距离的曲面仿生复眼相机^[10-12], 通过一块图像传感器对127个子眼进行数据采集, 保证了数据采集的同步性, 并将该曲面仿生复眼相机搭载在无人机上实现了对运动目标的探测。与此同时, 服务于复眼图像信息提取的相关算法也得到了重视和发展。2019年, 天津大学韩宇等^[13]对基本的SIFT(scale invariant feature transform)算法进行了改进, 在曲面仿生复眼测速系统中该方法可以快速、有效地解决特征点匹配的问题, 提高了测速的准确性和稳定性。2020年, 谭中慧^[14]团队利用opencv的车速测量算法和SIFT等图像算法对运动车辆进行目标角点检测, 根据图像像素与实际距离的对应关系得到汽车运动的实际距离。该方法相比传统车辆测速算法具有更好的鲁棒性, 能够得到更好的测量结果。

为了进一步探索曲面仿生复眼成像系统在测

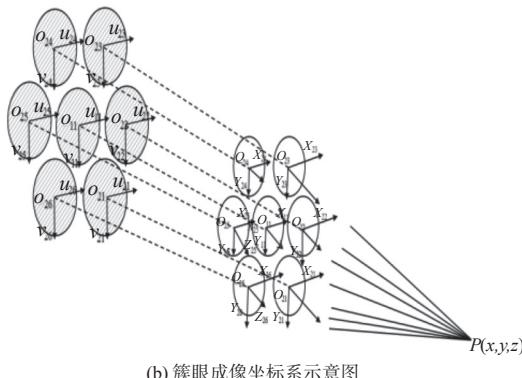
速方面的技术优势, 本文采用127个子眼曲面仿生复眼相机对运动目标的速度进行了测试研究, 建立了基于曲面仿生复眼的多目标速度测试模型, 设计了相关测速实验, 得到了准确的速度测试结果。同时为了突出复眼测速的优势, 采用成像性能相近的单孔径相机进行了测速实验, 并进行了比对, 结果表明, 曲面仿生复眼测速系统具有更高的准确性和稳定性。

1 曲面仿生复眼测速原理

本文采用的曲面仿生复眼相机, 由一块CMOS图像传感器对数据进行采集, 最终捕捉到的图像是由127个子图像组成一副完整图像。由于相邻子眼之间存在视场重叠, 所以相邻7个子眼可以同时获取到同一被测目标的位置信息。曲面仿生复眼系统测速原理如图1(a)所示。图1中, 中心子眼C1_1和周围相邻6个子眼C2_1, C2_2, C2_3, C2_4, C2_5和C2_6组成一组具有视场重叠特性的簇眼, 利用该簇眼可以对场景中同一运动目标同时进行测速。以目标P(x, y, z)所在位置建立世界坐标系o-xyz, 运动距离L后的坐标位置为P'(x', y', z'), 同时以7个子眼的中心建立相机坐标系O-X_{ij}Y_{ij}Z_{ij}, 最后以每个子眼所对应的子图像建立图像坐标系o-u_{ij}-v_{ij}, 如图1(b)所示。建立相邻子眼重叠视场数学模型, 在图像坐标系中利用SIFT特征匹配, 找出相邻子图像中对应的像素坐标, 通过如图2所示的图像几何变换可以得到相邻子图像之间的重叠像素数目, 从而计算出运动目标在图像坐标系中运动的像素数目。



(a) 测速原理图



(b) 簇眼成像坐标系示意图

图 1 曲面仿生复眼成像系统测速原理图和簇眼成像坐标系示意图

Fig. 1 Schematic of velocity measurement of curved bionic compound eye imaging system and diagram of cluster eyes imaging coordinate system

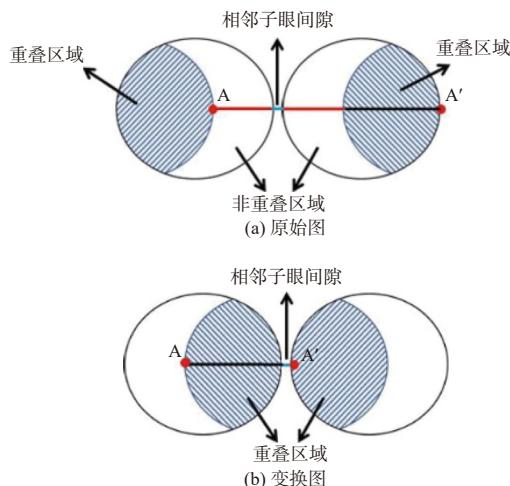


图 2 相邻子图像几何变换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of geometric transformation of adjacent sub-images

根据图 1(a)中测速原理,结合小孔成像模型以及三角形相似关系,则有:

$$\frac{L}{l} = \frac{D}{f}$$

式中: T 为运动时间; D 为拍摄距离; f 为曲面仿生复眼测速系统的焦距。

相邻 2 个子眼对同一目标在重叠视场内的成像示意图如图 2 所示,目标点分别对应 2 个视场的 A 点和 A' 点。由图 2 可知,经过对右子眼视场进行 180° 翻转,可以达到简化计算重叠像素数目的目的。假设 α_1 为有效像素数目(红色线段区域), α_2 为相邻子图像之间的像素数目(青色线段区域), α_3 为重叠区域的像素数目(黑色线段区域),则图像几何变换前后两点 A 和 A' 之间的总像

素数目 α_{before} 和 α_{after} 分别为

$$\alpha_{\text{before}} = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{after}} = \alpha_2 + \alpha_3 \quad (2)$$

在目标整个运动过程中,7 个子眼两两相对应,如图 3 所示。以图 3 中第一排(R1)为例, P 和 P' 分别代表对应子眼中的特征点位置。假设整个运动过程中总重叠像素为 $\Delta\alpha$, 已知每个像元大小为 ρ , 则图像坐标系中的位移量 l 为

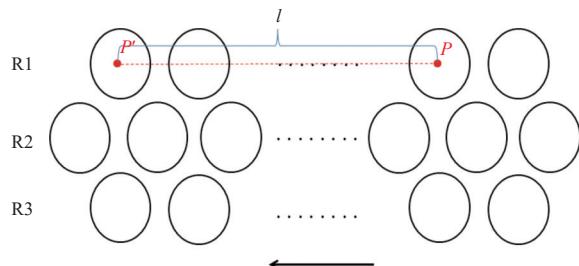


图 3 目标运动过程

Fig. 3 Target movement process

$$l = \rho \sqrt{(u_{ij} - u'_{ij})^2 + (v_{ij} - v'_{ij})^2} \quad (3)$$

运动目标的速度为

$$V = \frac{lD}{f(T_2 - T_1)} \quad (4)$$

式中: T 为运动时间, T_1 和 T_2 分别表示运动起始和结束的时间。

在整个实验过程中,以 C1_1 为参考子眼的 7 个相邻子眼,可以同时获取该场景中运动目标的位置信息。所以在一组实验数据中,针对运动目标的每个位置均存在七组位置对应关系,可通过公式(5)取平均值的方法来减少实验误差,得到更接近真实的速度:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{n=1}^7 \frac{l_n D}{f \Delta T_n}}{7} \quad (5)$$

2 曲面复眼相机测速实验

实验场地为单向三车道,宽度为 9 m,曲面仿生复眼测速系统固定在车道一侧,选择拍摄距离分别为 9.4 m 和 6.3 m。首先将相机摆放在合适位置,无遮挡物出现在相机的视野内,并使得运动目标能够在复眼相机和单孔径相机视野范围内运动。利用单孔径相机的录像功能,在同一次实验过程中,既能通过曲面复眼相机得到目标的运动信息,也可以利用单孔径相机得到目标的运动信息,这样大大减小了重复实验对数据造成的误差。

实验前, 利用外部电源给曲面仿生复眼相机供电, 输出端连入电脑, 通过 ipxplayer 软件实现对运动目标的拍摄。实验中, 利用曲面仿生复眼相机和单孔径相机分别在同一工作距离下对行驶在道路中的汽车进行拍摄, 汽车上标记一张黑色 A4 纸, 以 4 个黑色角点为目标进行特征点检测, 有利于后期数据处理, 汽车保持 8.33 m/s (30 km/h) 的速度匀速直线行驶。曲面仿生复眼相机在拍摄距离 9.3 m 和 6.4 m 处得到的全视场复眼融合图如图 4 所示。从图 4 可以看出, 该曲面仿生复眼相机具有良好的成像效果。

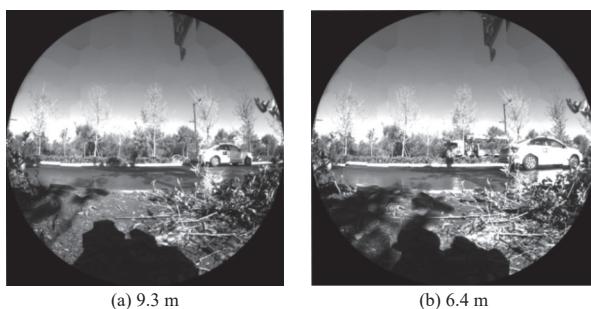


图 4 不同拍摄距离处曲面仿生复眼测速系统的融合图像

Fig. 4 Fusion image of curved bionic compound eye velocimetry system at different shooting distances

拍摄距离为 9.3 m 时汽车在复眼图像上的起始位置和终点位置如图 5 所示。从图 5 可以看出, 由于曲面仿生复眼相机的视场重叠优势, 在原始复眼图像上有一簇子眼可以观察到汽车的运动信息, 即利用曲面仿生复眼相机的视场重叠优势, 在一次实验中可以得到 7 组数据, 通过对这 7 组子眼的速度数据求平均值可使误差更小。

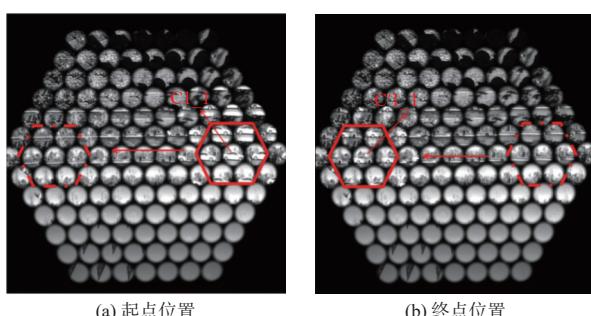


图 5 曲面仿生复眼测速系统的测速过程

Fig. 5 Velocity measurement process of curved bionic compound eye velocimetry system

以黑色 A4 纸为目标, 通过对感兴趣区域采用角点检测, 找出目标所在子眼像素坐标系下的坐标, 进而利用霍夫圆检测算法、图像分割和 SIFT

特征点匹配算法计算出重叠区域的像素数目。通过 MATLAB 对原始复眼图像进行图像分割, 得到相邻 2 个子眼的子图像, 如图 6 所示。



图 6 曲面仿生复眼系统相邻 2 个子眼的子图像

Fig. 6 Sub-images of two adjacent small eyes of curved bionic compound eye system

对相邻 2 个子图像进行特征点匹配, 从而计算出相邻 2 个子眼之间的重叠像素数目, 如图 7 所示。



图 7 相邻 2 个子图像的特征点匹配

Fig. 7 Feature point matching of two adjacent sub-images

在一次完整的采集过程中, 运动目标从 $C1_1$ 运动到所对应的 $C1'_1$, 采样时间 $T=1.37 \text{ s}$, 整个过程共经过了 9 个子眼, 每相邻 2 个子眼间会出现一次无图像区域和重叠区域。经计算, 无图像区域像素数目 $\alpha_2=10$, 相邻 2 个子眼之间的重叠像素数目 $\alpha_3=220$, 根据公式(2)可计算出拍摄距离为 9.3 m 时, 整个运动过程的总像素数目为

$$\Delta\alpha = 8\alpha_{\text{after}} = 8(\alpha_2 + \alpha_3) = 1840$$

在曲面仿生复眼相机对运动汽车进行拍摄过程中可以得到多幅复眼图像, 文中只给出了部分图像。根据文中复眼图像可知, 汽车运动中的 2 个位置 P 和 P' 相对应, 共有 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。根据表 1 中像素坐标, 并结合公式(3)、公式(4)可计算出汽车的平均速度以及相对误差, 如表 2 所示。

表 1 复眼不同拍摄距离处目标位置 P 和 P' 对应的像素坐标Table 1 Pixel coordinates corresponding to target positions P and P' at different shooting distances of compound eye

测试位置	子眼数	像素坐标(u_i, v_i)	
		$D=9.3\text{ m}$	$D=6.4\text{ m}$
P	1	(4 101, 2 581)	(4 547, 2 547)
	2	(3 822, 2 117)	(4 267, 2 080)
	3	(4 366, 2 105)	(4 810, 2 069)
	4	(4 647, 2 576)	(5 095, 2 537)
	5	(4 377, 3 052)	(4 825, 3 017)
	6	(3 835, 3 053)	(4 280, 3 022)
	7	(3 560, 2 589)	(4 004, 2 553)
P'	1	(851, 2 654)	(911, 2 631)
	2	(571, 2 182)	(632, 2 159)
	3	(1 118, 2 176)	(1 178, 2 155)
	4	(1 396, 2 645)	(1 455, 2 622)
	5	(1 134, 3 119)	(1 193, 3 095)
	6	(589, 3 128)	(646, 3 106)
	7	(308, 2 660)	(365, 2 638)

表 2 复眼不同拍摄距离处测试速度与实际速度对比

Table 2 Comparison of test speed and actual speed at different shooting distances of compound eye

测试位置/m	速度测量值 V /(m/s)						平均速度/(m/s)	误差/%
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6		
9.3	8.61	8.62	8.60	8.62	8.57	8.58	8.62	8.60
6.4	8.05	8.04	8.03	8.07	8.03	8.04	8.06	8.04

从表 2 中测试数据可以看出, 在一次完整的实验过程中, 曲面仿生复眼相机 7 组测试速度值比较稳定, 远距离拍摄汽车运动速度的相对误差控制在 4% 以内。因此, 曲面仿生复眼相机具有良好的远距离测速性能。

簇眼中 7 个子眼相对误差图如图 8 所示。下面对不同距离下的测速精度进行分析: (1) 在不同拍摄距离下, 运动目标经过的子眼数是不同的, 导致计算过程中重叠像素数目不同。因为每幅子图像周围存在光晕, 在对子图像进行分割时, 会导致部分像素数目丢失或增加, 从而影响最后的测速结果。(2) 本文利用 SIFT 特征点提取与匹配算法对目标进行等量代换, 特征点的运动速度等于目标的运动速度。在不同拍摄距离下, 目标出现在

图像中的大小不同, 确定对特征点的像素坐标存在 0~5 个像素数目的误差, 导致速度测量值存在误差。

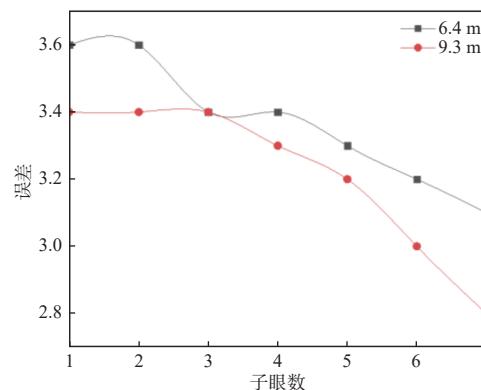


图 8 簇眼的相对误差

Fig. 8 Relative errors of cluster eyes

误差的产生主要与重叠像素数目的计算有关。不同拍摄距离时, 目标在复眼原始图像上经过的子眼个数不同, $D=9.3\text{ m}$ 时, 目标经过 9 个子眼, $D=6.4\text{ m}$ 时, 目标经过 8 个子眼。故运动过程中重叠像素数目不同, 导致速度误差不同。

3 曲面复眼相机与单孔径相机测速比对

为了比较曲面复眼相机和单孔径相机的测速能力, 选择视场和焦距与曲面复眼相机接近的单孔径相机进行测速实验。曲面仿生复眼相机与单孔径相机的参数对比如表 3 所示。

表 3 曲面仿生复眼相机与单孔径相机参数对比

Table 3 Comparison of parameters of curved bionic compound eye camera and single aperture camera

参数	数值	
	复眼相机	单孔径相机
子眼个数 N	127	1
球壳半径 R/mm	68	33
单个子眼直径 D/mm	7.4	66
像元尺寸 $a/\mu\text{m}$	4.5	11
单个子眼的视场角 $\Delta\varphi/(\text{°})$	14	/
相邻子眼的重叠角度/(\text{°})	7	/
相机帧速率/fps	13	23
总视场 $\omega/(\text{°})$	98×98	95.4×78.4
焦距 f/mm	5	6

曲面仿生复眼镜头半径为 68 mm^[15], 由 127 个子眼组成。每个子眼的直径为 7.4 mm, 子眼的焦距为 5 mm, 单个子眼的视场为 14°, 相邻子眼光轴之间的夹角为 7°, 角分辨率为 1.8 mrad。该复眼仿生系统的总视场角约为 98°×98°, 所有成像通道共用一个图像传感器, 选用索尼公司的型号为 NOIP-1SN025KA 的图像传感器, 图像采样速率为 13 fps, 传感器像元尺寸为 4.5 μm, 系统体积为 $\varnothing 123\text{ mm} \times 195\text{ mm}$, 系统总质量为 1.35 kg。

单孔径测速系统由 HS-95-U3 型号相机与单孔径镜头组成, 镜头半径为 33 mm, 系统的焦距为 6 mm, 该单孔径系统的总视场为 95.4°×78.4°。图像传感器选用的是 GSENSE400BSI, 图像的采样速率为 23 fps, 像元尺寸大小为 11 μm。单孔径测速系统总体积为 $\varnothing 66\text{ mm} \times 95\text{ mm}$, 系统总质量为 1 kg。

在曲面仿生复眼系统拍摄的同时, 得到单孔径相机对运动目标拍摄的一段视频, 视频时长 33 s, 共 697 帧图像, 单孔径相机帧频为 23 fps, 可知任意两帧图像之间的时间差。选取四帧图像, 每两帧图像可计算出一个速度值, 通过四幅分时图像排列组合得到 6 个速度测试值。在拍摄距离为 9.3 m 处, 单孔径相机通过视频处理得到两组的四幅图像帧, 分别是第 535 帧、545 帧、560 帧和 565 帧; 第二组是第 550 帧、563 帧、573 帧和 580 帧。在拍摄距离为 6.4 m 处, 单孔径相机通过视频处理得

到两组的四幅图像帧, 第一组是第 215 帧、220 帧、230 帧和 235 帧; 第二组是第 335 帧、340 帧、345 帧和 355 帧。单孔径测速系统与曲面仿生复眼测速系统选取同样的特征点, 结合 SIFT 算法匹配出每幅图像帧中特征点的像素坐标, 如表 4 所示。

表 4 单孔径相机不同拍摄距离处目标位置帧数对应的像素坐标

Table 4 Pixel coordinates corresponding to the number of target position frames at different shooting distances of single-aperture cameras

帧数	像素坐标(u_i, v_i)	
	9.3 m图像帧	6.4 m图像帧
535	215	(531, 957) (582, 941)
545	220	(768, 960) (738, 943)
560	230	(1 068, 965) (1 058, 950)
565	235	(1 156, 967) (1 183, 954)
550	335	(550, 958) (677, 958)
563	340	(833, 961) (833, 961)
573	345	(1 071, 966) (980, 963)
580	355	(1 227, 969) (1 283, 969)

根据表 4 中像素坐标, 并结合公式(3)和公式(4), 可计算出单孔径相机对汽车的平均速度以及相对误差, 如表 5 所示。

表 5 单孔径不同拍摄距离处测试速度与实际速度对比

Table 5 Comparison of test speed and actual speed at different shooting distances of single aperture

测试位置 D/m	速度测量值 $V(\text{m/s})$						平均速度/(\text{m/s})	实际速度/(\text{m/s})	误差/%
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6			
9.3	9.31	8.43	8.17	7.86	7.61	7.14	8.08	8.33	2.9
6.4	8.71	8.73	8.59	8.20	8.03	6.98	8.20	8.33	1.5
9.3	8.61	8.88	8.87	9.43	9.20	8.86	8.97	8.33	7.68
6.4	8.71	8.26	8.17	8.21	8.12	8.26	8.28	8.33	0.6

从表 5 中多组测试数据可以看出, 由单孔径相机得到的四帧图像可两两组合得到六组测试速度值, 发现六组测试值波动较大, 与实际速度值相比也出现较大的相对误差。

曲面仿生复眼测速系统与单孔径测速系统分别在拍摄距离为 6.4 m 和 9.3 m 处的速度测试值分布曲线如图 9 所示。图 9 中黑色曲线 $\cdots\blacksquare\cdots$ 和蓝色曲线 $\cdots\blacktriangledown\cdots$ 分别代表复眼测试值, 红色曲线 $\cdots\bullet\cdots$ 和青色曲线 $\cdots\blacklozenge\cdots$ 分别代表单孔径测试值,

绿色曲线 $\cdots\triangle\cdots$ 代表实际速度值。从图 9 可以明显看出, 曲面仿生复眼测速系统对高速运动目标的测速精度比单孔径测速系统更加稳定和准确, 曲面仿生复眼测速系统具有更快的激励反应, 第一个测试值就可以反应实际速度, 同时误差控制在 4% 以内。单孔径测速系统的测试值在 8.61 m/s~9.43 m/s 之间, 具有较大波动, 需要通过多次测试, 取平均值后才能得到一个更加准确的速度值。

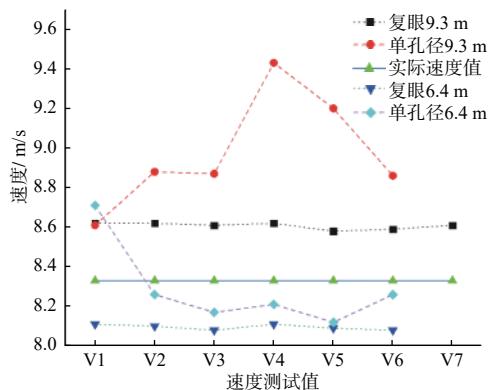


图 9 复眼和单孔径相机测速结果对比

Fig. 9 Comparison of velocity measurement results between compound eye and single aperture cameras

4 结论

本文使用的曲面仿生复眼相机在一定程度上解决了现有大视场、高分辨率成像与数据采集同步性、实时性之间的矛盾,并且实现了对高速运动目标进行广域监控的功能。从曲面仿生复眼与单孔径相机测速对比实验中可以看出,曲面仿生复眼测速系统可以实现一组 7 个子眼同时对高速运动的目标进行识别与分辨,并且相对于单孔径测速系统具有更好的稳定性与准确性。由于曲面仿生复眼相机结构小巧、携带轻便、功耗低,并且系统只采用一块图像传感器,从而确保了数据采集的同步性,同时图像处理过程全部在原始图像上进行,这样大大提高了运动目标的实时探测能力。因此,该相机在目标探测、安全监控等领域有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 林柏林. 基于视频序列图像的车辆测速的实现方法 [J]. 通信技术, 2013, 46(6): 90-92.
- LIN Bailin. Implementation method of vehicle speed measurement based on video sequence image [J]. Communications Technology, 2013, 46(6): 90-92.
- [2] 常子霆, 施雨晴, 王俊, 等. 基于双目视觉的车辆速度测量方法 [J]. 计算机科学, 2021, 48(9): 135-139.
- CHANG Ziting, SHI Yuqing, WANG Jun, et al. Vehicle speed measurement method based on binocular vision [J]. Computer Science, 2021, 48(9): 135-139.
- [3] 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.
- [4] TANIDA J, AKIYAMA H, KAGAWA K, et al. A stick-shaped multi-aperture camera for intra-oral diagnosis [C]// Conference on computational imaging. New York: International Society for Optics and Photonics, 2017.
- [5] DUPARRE J, DANNBERG P, SCHREIBER P, et al. Artificial apposition compound eye fabricated by micro-optics technology [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(22): 4303-4310.
- [6] COGAL O, LEBLEBICI Y A. Insect eye inspired miniaturized multi-camera system for endoscopic imaging [J]. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst*, 2017, 11(1): 212-224.
- [7] 张红鑫, 卢振武, 刘华. 对重叠复眼进行简化模拟与分析的新方法 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1847-1851.
- ZHANG Hongxin, LU Zhenwu, LIU Hua. A new method for simplified simulation and analysis of overlapping compound eyes [J]. Optical Precision Engineering, 2008, 16(10): 1847-1851.
- [8] 裴溯, 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. Field model of multi-aperture field of view overlapping compound eye based on micro-end fiber panel [J]. *Optical Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3018-3025.
- [9] 史成勇. 仿生曲面复眼系统设计及其图像处理研究 [D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2017.
- SHI Chengyong. Design and image processing of bionic curved compound eye system [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [10] PANG K, FANG F, SONG L, et al. Bionic compound eye for 3D motion detection using an optical freeform surface [J]. *Opt. Soc. Am.*, 2017, B 34: B28-B35.
- [11] 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): 232-238.
- XU Huangrong, LIU Jinheng, ZHANG Yuanjie, et al. Velocity measurement system of bionic compound eye imaging for uav [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 232-238.
- [12] 于晓丹, 张远杰, 王元元, 等. 小型无人机载大视场复眼相机光学系统设计 [J]. 光子学报, 2019, 48(7): 23-30.

- YU Xiaodan, ZHANG Yuanjie, WANG Yuanyuan, et al. Design of optical system for small uav large field compound eye camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(7): 23-30.
- [13] 韩宇, 宗群, 邢娜. 基于改进SIFT的无人机航拍图像快速匹配[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2019, 52(1): 5-9.
- HAN Yu, ZONG Qun, XING Na. Rapid matching of UAV aerial images based on improved SIFT[J]. *Journal of Nankai University (Natural Science Edition)*, 2019, 52(1): 5-9.
- [14] 谭中慧, 刘俊. 基于深度学习和OpenCV的车速测量算法[J]. [上海船舶运输科学研究所学报](#), 2021, 44(4): 39-44.
- TAN Zhonghui, LIU Jun. Vehicle speed measurement algorithm based on deep learning and openCV[J]. [Journal of Shanghai Institute of Shipping Science](#), 2021, 44(4): 39-44.
- [15] XU H R, ZHANG Y J, WU D S, 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.