

引用格式: YU Xiao-dan, ZHANG Yuan-jie, WANG Yuan-yuan, *et al.* Optical Design of a Compound Eye Camera with a Large-field of View for Unmanned Aerial Vehicles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(7): 0722003
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):0722003

小型无人机载大视场复眼相机光学系统设计

于晓丹^{1,2},张远杰^{1,2},王元元^{1,3},许黄蓉^{1,2},鱼卫星^{1,2}

(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 710119)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

(3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,长春 130033)

摘 要:针对小型无人机载大视场光学成像观测需求,设计了一款仿生复眼大视场微小型相机.该相机光学系统总焦距为 4 mm, F 数为 4,视场角可达 106° ,在 500 m 的飞行高度分辨率可达 0.5 m.所设计系统由曲面排布的微透镜阵列、光学像面变换子系统、图像接收和数据采集处理单元三部分组成.仿生复眼中的子透镜采用双胶合透镜组合以减小系统像差,相邻子透镜在满足视场一定重叠率的前提下,可允许相邻多达 7 个子透镜同时对地面目标进行成像,达到目标定位和测速的目的.仿真结果表明无人机载大视场复眼相机系统在给定的公差范围内像质满足要求,每个通道的光学畸变可控制在 1.2% 以下.

关键词:复眼;大视场;透镜阵列;光学设计;公差分析;目标定位

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20194807.0722003

Optical Design of a Compound Eye Camera with a Large-field of View for Unmanned Aerial Vehicles

YU Xiao-dan^{1,2}, ZHANG Yuan-jie^{1,2}, WANG Yuan-yuan^{1,3}, XU Huang-rong^{1,2}, YU Wei-xing^{1,2}

(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 710119, China)

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

(3 State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics & Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, China)

Abstract: A large field of view Unmanned Aerial Vehicle (UAV) camera imaging system, named curved compound eye camera for the small UAV, was designed. The system consists of three subsystems, a cured microlens arrays, an optical transformation subsystem, and a data processing unit with image sensors. The designed compound camera has a focal length of 4 mm, a F number of 4, and a field of view is 106° , which makes it can resolve the ground target with a feature size of 0.5 m at an altitude of 500 m. In the design, lenslets with a doublet form were used in curved compound eye to eliminate the optical aberrations. Since there is an overlap in field of view for neighboring lenslets, lenslets as much as of 7 can view the same target at the same time from different view angles, which allows the object location and speed measurement. The simulation results show that the image quality of the entire compound eye camera system meets the requirements with an acceptable tolerance, and the maximum optical distortion can be controlled under 1.2%.

基金项目:国家自然科学基金(No.61475156)

第一作者:于晓丹(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向为复眼相机的光学设计. Email:1308780090@qq.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、非常规光学成像及微纳光学与光子器件. Email:yuwx@opt.ac.cn

收稿日期:2019-03-08;录用日期:2019-04-17

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

Key words: Compound eye; Large field of view; Microlens array; Optical design; Tolerance analysis; Target positioning

OCIS Codes: 220.4830; 080.3620; 120.4820; 330.4060

0 引言

传统的无人机载相机大多属于单孔径系统,视场较小,为实现大视场成像,多采用相机阵列形式,同时亦可获得场景目标的三维信息.然而,阵列相机结构形式复杂,体积庞大,不适于搭载对载荷体积重量有限的无人机^[1-5].

目前,无人机载相机光学镜头设计集中于单孔径系统^[6].2012年蒋宁等^[7]针对 $4\,000\times4\,000$ 的面阵数字相机,设计了一种焦距90 mm、视场角 $23.15^{\circ}\times23.15^{\circ}$ 的相机,机械筒长为113 mm,在飞行高度为5 000 m时可实现0.5 m的地面像元分辨率.2016年朱海滨等^[8]设计了一款可见光波段折射式高分辨率小型无人机载相机、焦距为52.5 mm、视场角为 12° 、筒长约为126 mm,在飞行高度为1 500 m时可实现0.1 m的地面像元分辨率.可以看出,以上系统视场角都小于 25° ,无法满足广域观测需求.

本文针对现有的机载相机视场小,地面成像幅宽较窄,不能满足高效航拍作业的要求等缺点,设计了一款总焦距为4 mm, F 数为4,视场角为 106° 的小型无人机载大视场复眼相机.该相机在飞行高度500 m能够分辨0.5 m的地面目标.同时针对目标定位与测速需求,建立了相关多孔径目标定位数学模型.与现有的单孔径广角相机相比较,本文所设计复眼相机在大视场成像的情况下光学畸变更小,尤其边缘视场图像失真率得到了很好的控制.此外,复眼相机可在较低帧频情况下实现对运动目标的跟踪和运动参数测量,而常规单孔径广角机载相机则需要很高的帧频才能实现对高速运动目标进行跟踪和测量.所设计复眼相机光学结构尺寸为 $146\text{ mm}\times80\text{ mm}\times80\text{ mm}$,加上图像传感器和相应电子系统,整个复眼相机得体积可控制在 $170\text{ mm}\times90\text{ mm}\times90\text{ mm}$ 以内,重量约0.3 kg,可满足一般无人机对载荷的要求.该曲面型复眼机载相机,具有视场大、结构紧凑、灵敏度高、可多孔径同时探测运动目标等优点,在高空对地广域探测、目标定位与跟踪等领域有很大的应用前景.

1 机载复眼相机系统的设计

1.1 曲面仿生复眼相机的整体结构

如图1,本文设计的曲面复眼相机包括三个子系统:曲面排布小透镜阵列、光学变换子系统、带有图像传

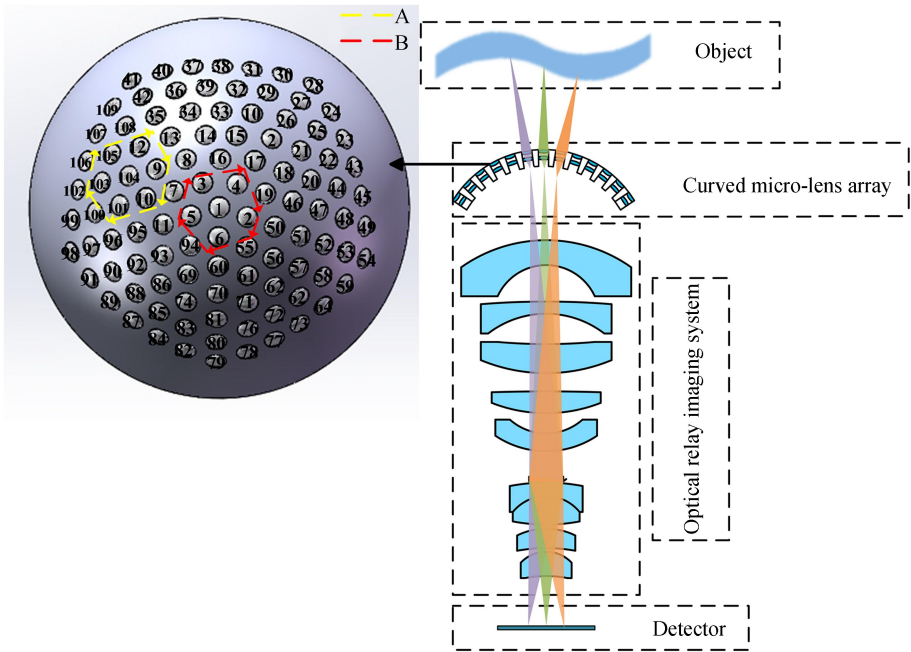


图 1 曲面复眼相机的结构图

Fig.1 The structure of the curved compound eye camera

传感器的数据处理单元.曲面基底为一个球冠,球冠面上排布多个小透镜.为了提高相邻小透镜的视场重叠率,如图 A 区域,所设计的中心透镜阵列采用正五边形的排布方式,其余为六边形的排布方式,如 B 区域^[9].所设计机载复眼相机的整体视场角为 106°,相邻小透镜沿光轴之间的夹角为 8°,曲面排布的小透镜为口径 6 mm 的双胶合透镜,采用传统的光学冷加工方法可以满足制作要求.

1.2 机载复眼相机的设计

光学系统的焦距可由式(1)确定

$$f'=\frac{a\times H}{\text{GSD}}$$

(1)

式中, a 是探测器的像元尺寸, H 是航拍高度,GSD 是地面的像元分辨率.根据设计指标要求,探测器选用 1 英寸,像元尺寸 $a=4\text{ }\mu\text{m}$,无人机载相机飞行高度 $H=500\text{ m}$,地面的像元分辨率 $\text{GSD}=0.5\text{ m}$,计算得到焦距 $f'=4\text{ mm}$.

同时根据曲面排布的微透镜阵列的成像理论,定义相邻透镜之间的视场重叠率

$$\sigma=\frac{2\alpha-\beta}{2\alpha+\beta}$$

(2)

式中, 2α 为单透镜的视场角, β 为曲面排布的相邻透镜光轴之间的夹角.如图 2,为保证相邻小透镜视场的重叠率 $\sigma>0$,则 $2\alpha>\beta$.

为减小系统的像差,小透镜阵列均采用 BK7 和 F4 组合的双胶合透镜.该系统的设计参数见表 1.

表 1 光学系统的结构参数

Table 1 Specifications of the optical system

Parameters	Numerical value
Detector size	1 inch
2α	10°
Optical size	146 mm×80 mm×80 mm
β	8°
f'	4 mm
Wavelength	464 nm 525 nm 617 nm
F	4
Small lens material	BK7,F4
Small lens aperture	6mm
Focal length of optical relay imaging system	10 mm

根据光学系统的结构参数,利用 ZEMAX 软件设计出的光学系统总体结构如图 3.

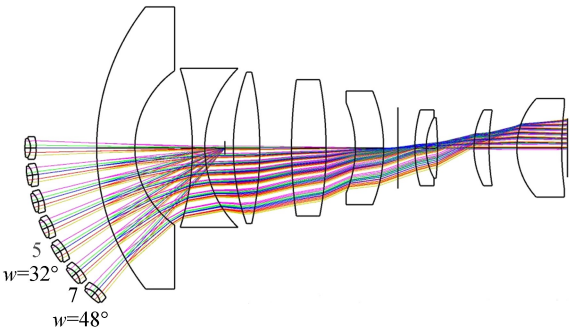


图 3 仿生复眼相机的光学系统结构图

Fig.3 Optical design result for the biomimetic compound eye system

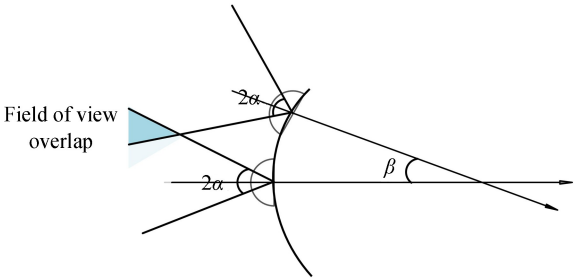


图 2 曲面排布的相邻小透镜视场重叠示意图

Fig.2 The schematic of the Field overlap for neighboring lenslets on the curved surface

2 像差性能分析

本文采用调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)及场曲畸变对光学系统的成像质量进行评价.该系统理论最高分辨率可由式(3)确定

$$N=\frac{1000}{2\times d}$$

(3)

计算得到 MTF 的奈奎斯特频率为 125 lp/mm.光学系统的 MTF 曲线见图 4,图 4(a)~(b)分别为小透镜在视场为 $\omega=32^\circ$ 和 $\omega=48^\circ$ 处的 MTF 曲线.由图 4 可见,在奈奎斯特频率处,最边缘小透镜($\omega=48^\circ$)的 MTF 值大于 0.35, $\omega=32^\circ$ 的小透镜的 MTF 值大于 0.42,与 $\omega=48^\circ$ 相比较 $\omega=32^\circ$ 处小透镜的 MTF 值下降了 16.7%.

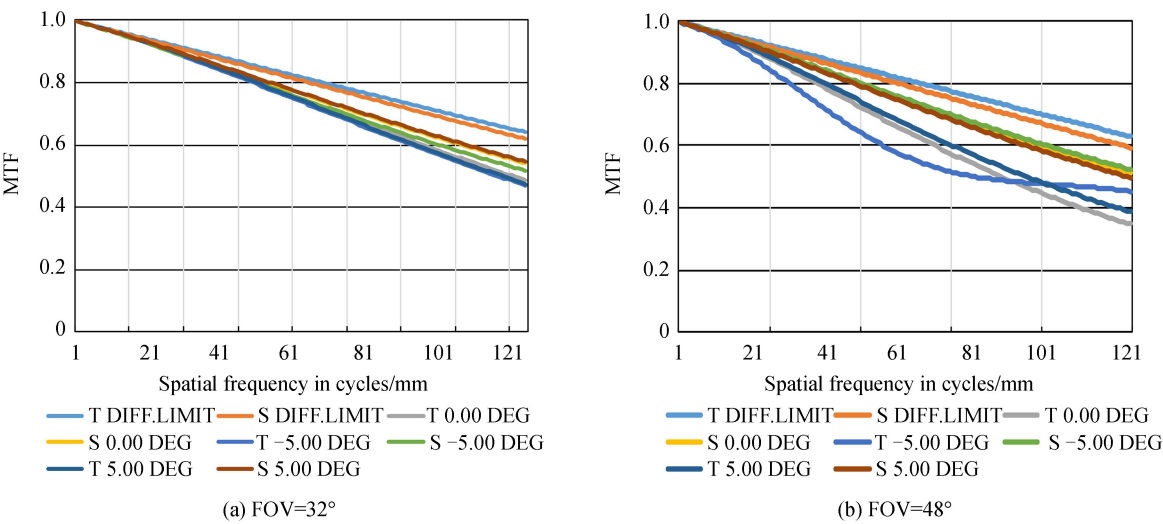


图 4 小透镜在不同位置处的 MTF
Fig.4 MTF curve for different FOVs

系统的场曲与畸变曲线如图 5 所示.由图 5 可知, $\omega=48^\circ$ 处的最大场曲为 $39\ \mu\text{m}$,小于系统的最大焦深 $39.8\ \mu\text{m}$,而畸变量的相对变化量小于 1.2%,实际值小于 $3.8\ \mu\text{m}$; $\omega=32^\circ$ 处的场曲小于 $20\ \mu\text{m}$ 且在最大焦深范围内,畸变量的相对变化量小于 0.6%,实际值小于 $2.5\ \mu\text{m}$.在本系统中,由于采集到的阵列图像需要进行拼接,要求小透镜阵列成像时的几何失真在 0.7 视场以外控制在 1 个像元以内.以失真最高的最大视场为例,计算系统在最边缘视场处的畸变实际值在 1 个像元内,畸变校正结果达到要求.

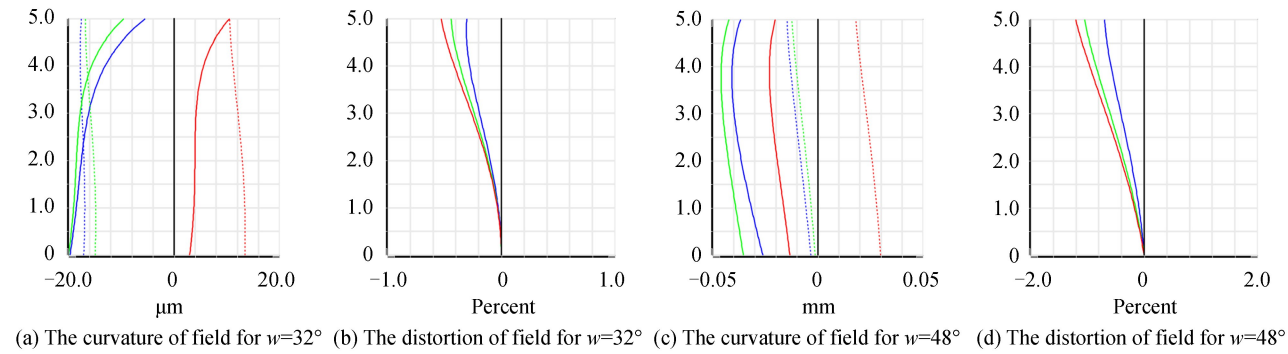


图 5 不同视场处的场曲和畸变图
Fig.5 The curvature of field and distortion for different FOVs

图 6 为所设计的系统对目标成像时像面的仿真结果.由图 6 可知,最边缘视场 $\omega=48^\circ$ 处的小透镜成像通道对目标成像时的仿真图存在一定畸变,但畸变量仅为 1.2%,通过图像处理比较容易矫正,因此通过图像仿真试验证明所设计的系统具有良好的成像效果.

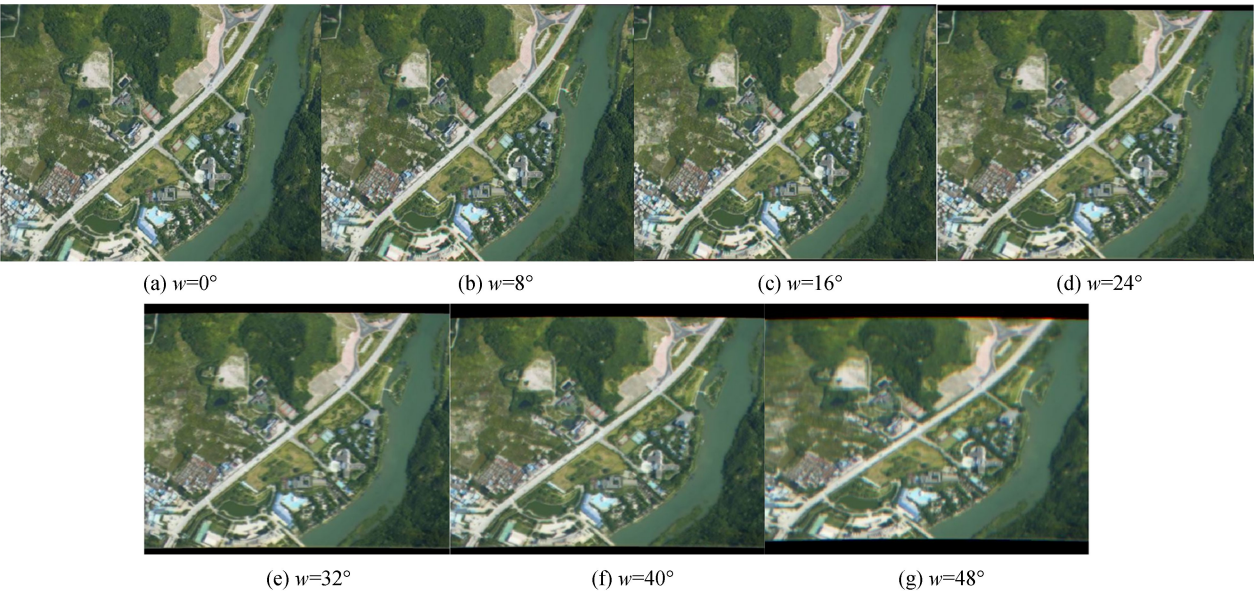


图 6 不同视场处的像面仿真图
Fig.6 The imaging simulation for different FOVs

3 公差分析

本文采用灵敏度分析的方法进行公差分析,选用 MTF 均值变化作为系统性能的评价标准,并利用 Monte Carlo 分析方法评估公差对系统成像质量的影响.图 7 为采用表 2 所示公差分配方案时的分析结果.如图 7 所示,在 MTF 为 125 lp/mm 处,超过 98%的样本在 $w=32^\circ$ 视场处的 MTF 预估值大于 0.36;在 $w=40^\circ$ 和 $w=48^\circ$ 的视场处,MTF 预估值均大于 0.2.该结果说明采用表 2 所示的公差分配方案,装配完成后的机载复眼相机系统可以满足成像质量要求.

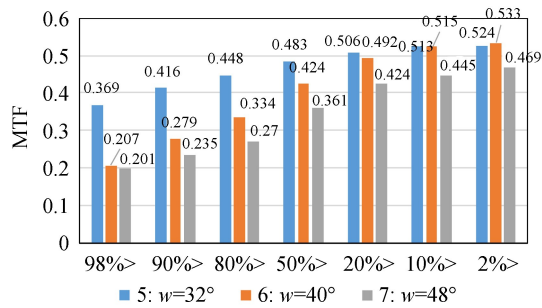


图 7 光学系统装配后传递函数预估分布图
Fig.7 MTF estimation of the optical system with fabrication error

表 2 公差操作数的参数

Parameters	Specification
Surface aperture	2
Radius of curvature tolerance	$\pm 0.1\text{ mm}$
Thickness tolerance	$\pm 0.05\text{ mm}$
Eccentricity of lens surface	$\pm 0.01\text{ mm}$
Inclination of a lens surface	$\pm 0.02^\circ$
Inclination of lens element	$\pm 0.2^\circ$
Refractive index tolerance	0.001
Abbe number tolerance	1%

4 机载复眼相机的目标定位与测速

地面目标定位是无人机的重要功能之一.目前,高精度的无人机目标定位已成为国内外科研工作者的研究热点^[10-12].本文设计的机载大视场复眼相机不仅能够记录物体的二维强度信息,也能记录光线在不同位置的方向信息,最终得到阵列式多幅大视场图像.如图8所示,以G透镜为中心,周围六个小透镜(ABCDEF)可以同时对面运动的同一目标进行定位与测速.

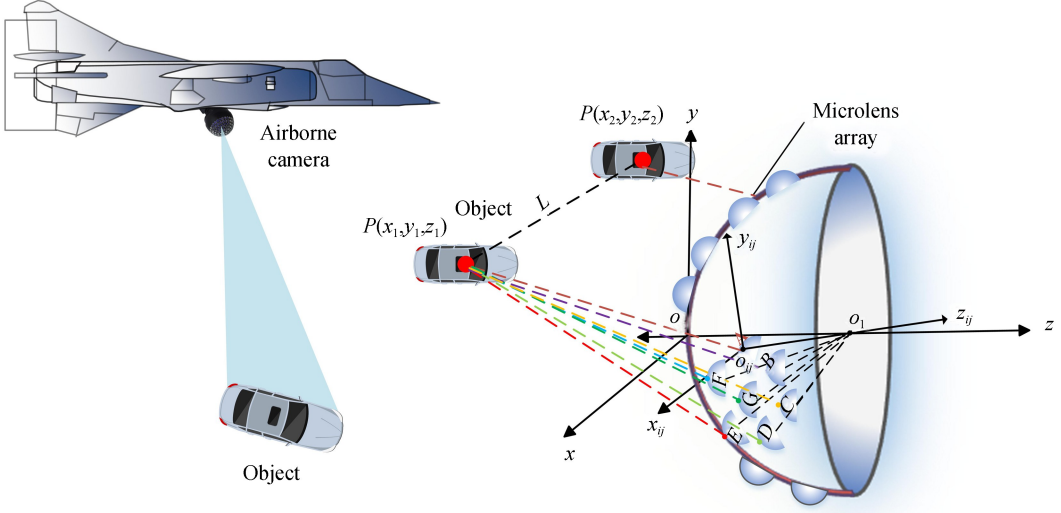


图8 复眼相机定位测速原理图

Fig.8 The principle of the target positioning for the curved compound eye

假设目标 p 点在 $o-xyz$ 坐标系中的空间坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 绕行距离 L 后的坐标为 (x_2, y_2, z_2) . 以每个小透镜的中心建立阵列坐标系记为 $o_k-x_ky_kz_k$ (k 表示透镜的记号). 在 $o_k-x_ky_kz_k$ 坐标系中, 入射光线 $AP, BP, CP, DP, EP, FP, GP$ 的方向向量为 $(\tan \alpha_k, \tan \beta_k, 1)$ ^[13]. 根据球面坐标系变换计算得到在 $o-xyz$ 坐标系下的光线 $AP, BP, CP, DP, EP, FP, GP$ 的方向向量为

$$\begin{bmatrix} \tan \alpha'_k \\ \tan \beta'_k \\ \tan \gamma'_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\cos \varphi \sin \theta & \sin \theta \sin \varphi \\ \sin \theta & \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \theta \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tan \alpha_k \\ \tan \beta_k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

最终得到 $o-xyz$ 坐标系中, 以 G 透镜为中心, 周围六个小透镜(ABCDEF)与目标点 $p(x_1, y_1, z_1)$ 之间的关系为

$$\begin{cases} \frac{x_1 - x_A}{\tan \alpha'_A} = \frac{y_1 - y_A}{\tan \beta'_A} = \frac{z_1 - z_A}{\tan \gamma'_A} = t_A \\ \frac{x_1 - x_B}{\tan \alpha'_B} = \frac{y_1 - y_B}{\tan \beta'_B} = \frac{z_1 - z_B}{\tan \gamma'_B} = t_B \\ \dots\dots \\ \frac{x - x_G}{\tan \alpha'_G} = \frac{y - y_G}{\tan \beta'_G} = \frac{z - z_G}{\tan \gamma'_G} = t_G \end{cases} \quad (5)$$

式中, θ, φ 分别表示小透镜中心与 x 轴的夹角和与 z 轴的夹角. 透镜中心坐标 (x_k, y_k, z_k) 在 $o-xyz$ 坐标系下由式(6)计算为

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm r \sin \theta \cos \varphi \\ \pm r \sin \theta \sin \varphi \\ \pm r \cos \theta - r \end{bmatrix} \quad (6)$$

结合式(4)~(6)得到方程组

$$\begin{cases} a_A x + b_A y + c_A z + d_A = 0 \\ a_B x + b_B y + c_B z + d_B = 0 \\ a_C x + b_C y + c_C z + d_C = 0 \\ \dots\dots\dots \\ a_G x + b_G y + c_G z + d_G = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由于所设计的机载复眼相机系统可允许相邻 7 个子透镜同时对地面目标进行成像,因此光线 $AP, BP, CP, DP, EP, FP, GP$ 相交于一点 p ,即式(7)有解,简化得到矩阵

$$\mathbf{R}_{7 \times 3} \mathbf{X}_{3 \times 1} = \mathbf{D}_{7 \times 1} \quad (8)$$

利用最小二乘法解超定方程组式(7),即可得到目标点在空间三维 $o-xyz$ 坐标系下的 (x_1, y_1, z_1) .同理,当物体移动 L 距离后,可求得被其它成像单元同时捕获后的空间点坐标 (x_2, y_2, z_2) .物体移动的空间距离为

$$\mathbf{l} = (x_1 - x_2)\mathbf{i} + (y_1 - y_2)\mathbf{j} + (z_1 - z_2)\mathbf{k} \quad (9)$$

针对无人机在 500m 的高空对地面运动的目标进行定位时,若已知所设计的机载复眼相机拍摄运动目标的时间间隔 T ,最终可获得地面目标的空间相对平均速度

$$\begin{bmatrix} v_{ox1} \\ v_{oy2} \\ v_{oz3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} \frac{1}{T} \quad (10)$$

当空中平台匀速运动时,假定平台和目标同向运动,令平台在时间间隔 T 内平均速度的三轴分量分别为 v_{ox}, v_{oy}, v_{oz} ,则目标相对地面的平均速度为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ox1} \\ v_{oy2} \\ v_{oz3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ox} \\ v_{oy} \\ v_{oz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} \frac{1}{T} + \begin{bmatrix} v_{ox} \\ v_{oy} \\ v_{oz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

5 结论

本文设计了一款无人机载仿生复眼相机系统,解决了现有的机载相机视场小,地面成像幅宽较窄,不能满足实时对地目标进行拍摄的问题.针对系统的成像质量进行了校正,并建立了曲面基底上相邻 7 个子透镜同时识别目标的定位与测速的数学模型.该系统结构紧凑、体积小、视场大,在机载相机广域监视和观测等领域有着很大的应用前景.

参考文献

- [1] GUO Shu-ji, SHI Li-fang, CAO A-xiu, *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.
- [2] LEI Wei-ning, GUO Yun-zhi, GAO Ting-ting. Study on the structure of large field 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] GONG Xian-wei, YU Wei-xing, ZHANG Hong-xin, *et al.* Progress in design and fabrication of artificial compound eye optical systems[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(1): 34-45.
巩宪伟,鱼卫星,张红鑫,等.仿生复眼成像系统设计及制作的研究进展[J]. *中国光学*, 2013, **6**(1): 34-45.
- [4] LEE Lun, HAO Yong-ping, DIAO Xiao-lei, *et al.* Aspherical compound eye optimization and positioning technology with variable focal length[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1022001.
李伦,郝永平,刁晓蕾,等.可变焦距的非球面复眼优化及定位技术[J]. *光子学报*, 2018, **47**(10): 1022001.
- [5] PANG Kuo, FANG Feng-zhou, SONG Le, *et al.* Bionic compound eye for 3D motion detection using an optical freeform surface[J]. *Journal of the Optical Society of American*, 2017, **34**(5): B28-B35.
- [6] HANG Chang-yuan. Study on optical system of high resolution space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2165-2172.
韩昌元.高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2165-2172.
- [7] JIANG Ning, JIA Ji-qiang, JIN Can-qiang, *et al.* Design for optical lens of the UAV plane array digital camera on the aircraft[J]. *Equipment and Technology*, 2012, **6**: 35-37.

- 蒋宁, 贾继强, 金灿强, 等. 无人机载面阵数字相机光学镜头设计[J]. 装备制造技术, 2012, **6**: 35-37.
- [8] ZHU Hai-bin, ZHANG Yuan-jian, ZHU Da-lue, *et al.* Design of high resolution objective on small UAV[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2016, **31**(3): 5-8.
- 朱海滨, 张远健, 朱大略, 等. 小型无人机载高分辨率物镜设计[J]. 光电技术应用, 2016, **31**(3): 5-8.
- [9] PANG Wu-bin, HUANG Wei, WANG Xin-hua, *et al.* Research of micro-lenses packing strategy on spherical surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(5): 0522003.
- 庞武斌, 黄玮, 王新华, 等. 微镜头阵列球面排布方法研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(5): 0522003.
- [10] TISDALE J, RYAN A, KIM Z, *et al.* A multiple system for vision-based search and location[C]. American Control Conference, IEEE, 2008: 1985-1990.
- [11] SHI Li-juan, XIONG Zhi, BAI Qing-qing, *et al.* Research on Multi-point location algorithm of UAV and its error characteristics[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2015, **45**(4): 57-60.
- 施丽娟, 熊智, 柏青青, 等. 无人机多点测距目标定位算法及其误差特性研究[J]. 航空计算技术, 2015, **45**(4): 57-60.
- [12] YU Sha-sha, HUANG Hao, LIU Yang-jie, *et al.* Binocular stereovision technology based autonomous 3D location method for unmanned aerial vehicles[J]. *Computer Measurement and Control*, 2018, **26**(9): 223-231.
- 余莎莎, 黄浩, 刘洪杰, 等. 基于双目技术的无人机自主三维定位方法研究[J]. 计算机测量与控, 2018, **26**(9): 223-231.
- [13] CAO Zhao-lou, ZHAN Zhen-xian, WANG Ke-yi. Structural design of spherical compound eye lens for moving object detection[J]. *Infrared and Laster Engineering*, 2011, **40**(1): 70-73.
- 曹兆楼, 詹珍贤, 王克逸. 用于运动目标探测的球面复眼透镜的结构设计[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(1): 70-73.