

## 仿生复眼成像系统角度误差

田钰麒,高天元,赵宇,付跃刚

(长春理工大学光电工程学院,吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了实现仿生复眼成像系统的误差分析,介绍了一种误差分析的方法。建立了数学模型,通过找出坐标系的基底转换矩阵实现大地坐标和以子眼为原点的坐标系之间的转换,推导出当仿生复眼工作时其旋转角度与各参量之间的数量关系式,即系统的测量方程。运用函数误差方法将测量方程转化为误差函数方程,从而进行误差分析。并且搭建了实验,采集了实验数据,通过比对理论计算值与实际测量数据验证该分析方法的可行性。计算得系统理论旋转角度误差为  $3'14''$ ,实际测得的旋转角度误差  $3'15''$ ,理论计算值与实际测量值基本一致,证明该误差分析方法是可行的。

**关键词:** 仿生复眼光学系统; 误差分析; 函数误差; 坐标转换; 测量方程

**中图分类号:** Q692;Q439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0310001

## Angle error of bionic compound eye imaging system

Tian Yuqi, Gao Tianyuan, Zhao Yu, Fu Yuegang

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to realize the error analysis of the bionic compound eye imaging system, a method of error analysis was introduced. The mathematical model was established. By finding the conversion matrix of the coordinate system, the transformation between the geodetic coordinate and the coordinate system with the subeye as the original point was realized. The equation of quantity relation between the rotation angle and the parameters of the bionic compound eye, that is, the measurement equation of the system, was derived. By using the method of function error, the measurement equation was transformed into an error function equation, and the error analysis was carried out. The experiment was set up, and the experimental data were collected. The feasibility of the analysis method was verified by comparing the calculated values with the actual measurement data. Theory calculated rotation angle systematic error is  $3'14''$ . Actual measured rotation angle error is  $3'15''$ . The calculated value of the theory is in agreement with the actual measured value, which proves that the error analysis method is feasible.

**Key words:** bionic compound eye optic system; error analysis; function error; coordinate transformation; measurement equation

收稿日期:2017-10-05; 修订日期:2017-11-23

基金项目:吉林省自然科学基金(201215131)

作者简介:田钰麒(1991-),男,硕士生,主要从事光学结构、动态光学方面的研究。Email:289016846@qq.com

导师简介:付跃刚(1972-),男,教授,博士生导师,主要从事复杂光学系统设计及装调、仿生光学技术等方面的研究。

Email:fuyg@cust.edu.cn

通讯作者:高天元(1970-),男,副研究员,博士,主要从事现代光学技术、工程应用方面的研究。Email:gtg@cust.edu.cn

## 0 引言

随着计算机、机械加工、探测器等技术的不断提高,传统的单口径成像系统在目标的识别、定位、跟踪中暴露出很多问题,其中最主要的是其无法满足大视场和高分辨率。因此,寻找一种结构能够在保证大视场的情况下不牺牲分辨率成为近来一个重要的课题<sup>[1]</sup>。在仿生光学方向,昆虫的复眼结构给了人们重要的启发,该结构可以在保证大视场的基础上得到高分辨率的图像,并且研究者发现昆虫的复眼结构相较于哺乳动物单口径眼拥有更短的反应时间<sup>[2]</sup>。复眼的各项优点使其在空间搜索、导引头等领域得到了广泛的应用,各个国家在复眼成像光学系统的研究上投入了大量的人力、物力<sup>[3]</sup>。

1980年,美国在空对地导弹的研制过程中,根据苍蝇的精确定位特点制作了相应的工程模型,该模型可同时拍摄 1 320 张清晰的图片<sup>[4]</sup>。2000年,日本的 Tanida J 研制了 TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics)并列式复眼成像系统,该结构的光采集组件是微透镜阵列,接受组件为光探测器,各通道通过光隔离层得以分离,最后得到的信息经计算机重新拼接。TOMBO 拥有结构轻便、视场大的优点,更是为以后的复眼研究提供了参考<sup>[5]</sup>。

2004年, Duparre 带领的德国研究小组提出并制造了人造同位复眼成像系统 (Artificial Apposition Compound Eye Objective, AACEO),该复眼子眼通道的光学系统采用了啁啾透镜,可以根据入射光线的角度对各透镜的孔径大小、光轴方向以及形状进行适当调整<sup>[6]</sup>。此外,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所也对复眼作出了相应的研究,提出了曲面场镜阵列,在提高了视场角的同时拥有更高的成像质量<sup>[7-10]</sup>。仿生复眼的研究对军用和民用都具有重要的意义<sup>[11-15]</sup>。

对于仿生复眼的误差分析并未见过多的研究,文中通过对已有的仿生复眼成像系统建立数学模型,推导出响应时间短、测量精度高的数学关系,通过数学关系分析多种误差对系统总误差的影响,并进行误差合成。比对在系统装调时得到的误差和理论分析误差的结论,验证该方法的可行性。

## 1 仿生复眼成像系统

系统采用曲面式结构,文中以三组元复眼系统

为例进行分析。图 1 为复眼成像系统纵向结构原理图,图中  $O$  为子眼光轴交点,  $O_2$ 、 $O_3$  为边缘子眼系统,  $O_1$  为中心系统,  $\kappa_1$ 、 $\kappa_2$  为相邻通道光轴夹角,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  为子眼半视场角。

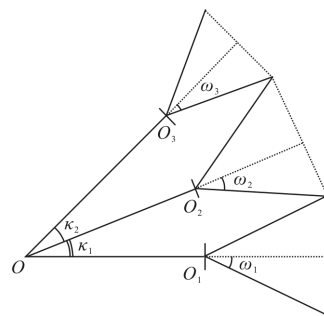


图 1 复眼结构原理图

Fig.1 Principle diagram of compound eye structure

系统在实际运用中,由边缘子眼进行对目标的探测,当发现目标后通过伺服机构对自身调整,将中心子眼对准目标,由中心子眼完成对目标的识别与确认。所以边缘子眼的视场角相对较大,分辨率相对较低;中心子眼的视场角相对较小,但分辨率相对较高。根据相关计算,设置中心子眼与边缘子眼参数如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

表 1 子眼系统光学参数

Tab.1 Optical parameters of sub-eye system

	Center eye	Edge eye
Field of view/(°)	5.1	15.2
Focal length/mm	60	20
F number	2.3	2.6

图 2 为仿生复眼球体结构示意图。系统参数经严格计算得出,每个孔为系统的子眼通道,子眼光轴

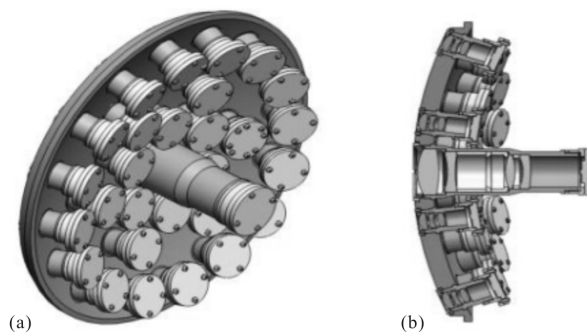


图 2 仿生复眼结构剖面图

Fig.2 Cutaway view of bionic compound eye structure

交点到球面的距离为系统半径  $R$ , 240 mm, 系统半弦长为 93 mm, 系统半视场角  $\omega' = \kappa_1 + \kappa_2 + \omega_3$ , 全视场角大于  $50^\circ$ , 满足指标要求<sup>[17]</sup>。同时子眼图像拼接无盲区, 保证了系统正常工作。

## 2 复眼成像系统数学模型

当仿生复眼成像系统探测到目标时, 伺服机构控制系统旋转相应的角度, 调整自身的姿态, 使主眼对准目标, 从而实现对目标的跟踪。而在实际探测中, 各因素会影响旋转角度的准确性, 为了进行总误差分析, 建立数学模型探究各因素对旋转角度误差的影响。

如图 3 所示,  $O$  为光轴交点,  $O_2$  为第一阵列子眼成像系统前主点, 以  $O$  为原点, 主眼光轴为  $z$  轴, 指向目标方向为  $z$  轴正方向, 建立右手直角坐标系  $oxyz$ 。以  $O_2$  为原点, 光轴为  $z_m$  轴, 指向目标方向为  $z_m$  轴正方向, 过  $O_2$  平行于  $x$  轴作  $z_m$  轴垂线为  $x_m$  轴, 建立右手坐标系  $o_2x_my_mz_m$ 。  $O \sim O_2$  的距离为系统半径  $R$ ,  $O_2'$  为子眼  $O_2$  在  $xoz$  平面的投影点, 子眼前主点与后主点的距离为  $d$ 。  $\theta$  为主眼与子眼光轴所成空间夹角,  $\alpha$  为  $\theta$  在  $xoz$  面的投影角,  $\beta$  为  $\theta$  在  $yo_2z_m$  面的投影角。

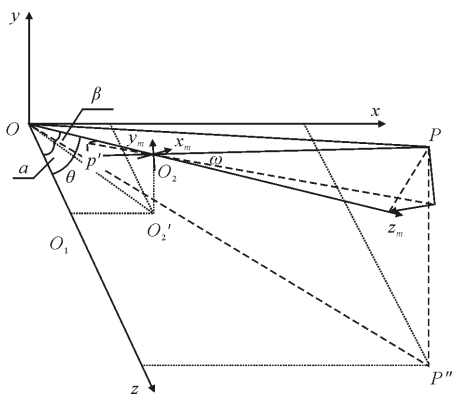


图 3 系统成像原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of system imaging principle

设  $o_2x_my_mz_m$  的基底向量为  $(i_m, j_m, k_m)$ ,  $oxyz$  的基底向量为  $(i, j, k)$ , 坐标系  $o_2x_my_mz_m$  经过两次旋转变换成为坐标系  $oxyz$ , 绕  $x_m$  轴向下旋转  $\beta$  角, 再绕  $y_m$  轴顺时针旋转  $\alpha$  角, 第一次旋转矩阵记为  $R_1$ , 第二次旋转矩阵记为  $R_2$ 。所以有:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (2)$$

记  $R_0 = R_1 R_2$ , 所以:

$$R_0 = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ \sin\alpha\sin\beta & \cos\beta & \sin\beta\cos\alpha \\ \sin\alpha\cos\beta & -\sin\beta & \cos\beta\cos\alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据公式(3), 可以将其中一坐标系中的向量在另一坐标系下标定,  $(i, j, k) = (i_m, j_m, k_m)R_0$ 。

$P$  点为空间一跟踪点,  $P''$  为  $P$  点在  $xoy$  平面的投影点, 它在  $o_2x_my_mz_m$  坐标系下标定为  $(x_m, y_m, z_m)$ 。根据公式(3), 转化为  $oxyz$  坐标系下标定为  $(x_m\cos\alpha + z_m\sin\alpha\sin\beta + y_m\sin\alpha\sin\beta, y_m\cos\beta + z_m\sin\beta, -x_m\sin\alpha + z_m\cos\alpha\cos\beta + y_m\sin\beta\cos\alpha)$ , 所以在坐标系  $oxyz$  下, 向量  $OP$  的坐标  $(x_m\cos\alpha + z_m\sin\alpha\sin\beta + y_m\sin\alpha\sin\beta, y_m\cos\beta + z_m\sin\beta, -x_m\sin\alpha + z_m\cos\alpha\cos\beta + y_m\sin\beta\cos\alpha)$ 。向量  $OP''$  的坐标  $(x_m\cos\alpha + z_m\sin\alpha\sin\beta + y_m\sin\alpha\sin\beta, 0, -x_m\sin\alpha + z_m\cos\alpha\cos\beta + y_m\sin\beta\cos\alpha)$ , 向量  $OP$  与向量  $OP''$  的夹角记为  $\beta'$ , 根据向量的坐标, 有:

$$\cos\beta' = \frac{OP \cdot OP''}{|OP||OP''|} \quad (4)$$

又因子眼单口径成像原理:

$$\frac{x_m}{y_m} = \frac{x'}{f} = \frac{y'}{f} = \tan\omega \quad (5)$$

式中:  $\omega$  为子眼入射角;  $f$  为子眼系统焦距;  $(x', y')$  为  $P$  点的成像点  $P'$  在探测器上的坐标。所以根据公式(4)、(5), 有:

$$\beta' = \arccos \left[ \left( \frac{x'}{f} \right)^2 + \cos^2\beta - \frac{y'}{f} \sin 2\beta + \left( \frac{y'}{f} \right)^2 \sin^2\beta \right] \quad (6)$$

式中:  $\beta'$  即为系统在跟踪目标时竖直方向的旋转角。

根据上述原理, 设  $OP''$  与  $z$  轴的夹角为  $\alpha'$ , 设  $z$  轴的方向向量  $k$  为  $(0, 0, 1)$ , 根据上述已求得的  $OP''$ , 有:

$$\cos\alpha' = \frac{OP'' \cdot k}{|OP''||k|} \quad (7)$$

所以:

$$\alpha' = \arccos \left( \cos\alpha\cos\beta - \frac{x'}{f} \sin\alpha + \frac{y'}{f} \sin\beta\cos\alpha \right) \quad (8)$$

式中:  $\alpha'$  即为系统在跟踪目标时水平方向的旋角。

上述即为仿生复眼成像系统的数学模型, 系统在实时追踪目标时, 同时完成水平方向与竖直方向的旋转, 以边缘第一列子眼为原点建立右手直角坐标系, 直接将物点坐标转化为像点坐标, 当系统探测复杂目标时, 通过该模型可以快速进行数据计算, 大

大降低了系统追踪时间,提高了系统追踪精度。

### 3 理论误差与实验误差

根据误差分析理论,将上述数学关系对每一项因变量求导,可以得到误差函数,从而可以得出各因素对总旋转误差的影响<sup>[18]</sup>。根据已经得出的仿生复眼数学模型,可以得到系统在跟踪目标时的旋转角与探测器分辨率( $x, y$ )、子眼焦距 $f$ 、光轴之间夹角 $\theta$ 相应的数学关系。

对垂直旋转角 $\beta'$ 分别求取竖直角 $\beta$ , 焦距 $f$ 和分辨率 $x', y'$ 的导数:

$$\begin{cases} \frac{\partial \beta'}{\partial \beta} = -\frac{1}{1-M^2} \left[ \left[ \left( \frac{x'}{f} \right)^2 - 1 \right] \sin 2\beta - 2 \frac{y'}{f} \cos 2\beta \right] \\ \frac{\partial \beta'}{\partial f} = \frac{2}{1-M^2} \left[ \frac{x'}{f^3} - \frac{y'}{f^2} \sin \beta \cos \beta + \left( \frac{x'}{f^3} \right) \sin^2 \beta \right] \\ \frac{\partial \beta'}{\partial x'} = -\frac{2}{1-M^2} (1 + \sin^2 \beta) \frac{x'}{f^2} \\ \frac{\partial \beta'}{\partial y'} = \frac{2}{1-M^2} \frac{\cos 2\beta}{f} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $M = \left[ \left( \frac{x'}{f} \right)^2 + \cos^2 \beta - \frac{y'}{f} \sin 2\beta + \left( \frac{y'}{f} \right)^2 \sin^2 \beta \right]$ 。

再对水平旋转角 $\alpha'$ 求取水平角 $\alpha$ 、平面角 $\beta$ 、焦距 $f$ 和分辨率 $x', y'$ 的导数:

$$\begin{cases} \frac{\partial \alpha'}{\partial \alpha} = \frac{1}{1-N^2} \left( \frac{x'}{f} \cos \alpha + \sin \alpha \cos \beta + \frac{y'}{f} \sin \alpha \sin \beta \right) \\ \frac{\partial \alpha'}{\partial \beta} = \frac{1}{1-N^2} \left( \sin \beta \cos \alpha - \frac{y'}{f} \cos \beta \cos \alpha \right) \\ \frac{\partial \alpha'}{\partial f} = -\frac{1}{1-N^2} \left( \frac{y'}{f^2} \sin \beta \cos \alpha - \frac{x'}{f^2} \sin \alpha \right) \\ \frac{\partial \alpha'}{\partial x'} = \frac{1}{1-N^2} \left( \frac{\cos \alpha}{f} \right) \\ \frac{\partial \alpha'}{\partial y'} = -\frac{1}{1-N^2} \left( \frac{\cos \alpha \cos \beta}{f} \right) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $N = \cos \alpha \cos \beta - \frac{x'}{f} \sin \alpha + \frac{y'}{f} \sin \beta \cos \alpha$ , 公式(9)、(10)等式左侧称为误差系数。

根据误差合成理论,因各变量之间无直接关系,所以有:

$$\Delta \beta' = \frac{\partial \beta'}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial \beta'}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial \beta'}{\partial x'} \Delta x' + \frac{\partial \beta'}{\partial y'} \Delta y' \quad (11)$$

$$\Delta \alpha' = \frac{\partial \alpha'}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial \alpha'}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial \alpha'}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial \alpha'}{\partial x'} \Delta x' + \frac{\partial \alpha'}{\partial y'} \Delta y' \quad (12)$$

式中: $\Delta \alpha, \Delta \beta$ 为系统分别在水平与垂直方向旋转角的误差; $\Delta \beta, \Delta \alpha, \Delta f, \Delta x', \Delta y'$ 为直接测量误差。根据

误差合成理论:

$$\Delta = \sqrt{(\Delta \alpha')^2 + (\Delta \beta')^2} \quad (13)$$

将公式(9)~(12)代入公式(13)中得到的 $\Delta$ 即为系统总旋转误差。根据上述公式,就可以通过测量光轴间夹角( $\Delta \beta, \Delta \alpha$ )、子眼焦距( $\Delta f$ )和探测器分辨率( $\Delta x', \Delta y'$ ),从而计算出复眼光学成像系统的总旋转误差。

使用 Leica 5100A 经纬仪、Zolix MC600 步进电机控制箱和 Zolix KSA050-12-Z 旋转平台搭建实验来验证理论可行性。图4为使用经纬仪测量主眼与子眼光轴夹角的实验图。

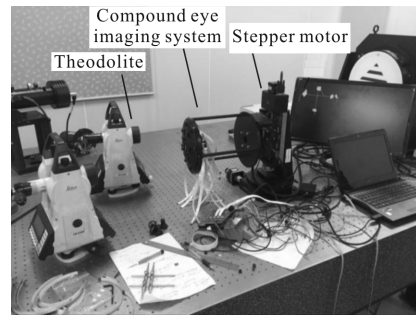


图4 光轴间夹角测量实验

Fig.4 Measurement experiment of optical axis angle

因为主要探究装调对系统总误差的影响,同时为了使测量数据简单化,将经纬仪十字叉丝设置在子眼光轴上,即 $P'$ 点在像面坐标为(0,0)。图5为两通道观测的十字叉丝。以第一阵列子眼为例进行实验,其光轴与主眼光轴的夹角为 $7^\circ 48'$ ,根据空间角计算法则,其平面角 $\alpha, \beta$ 的理论值约等于 $3^\circ 54' 36''$ 、 $6^\circ 45'$ ,边缘子眼的焦距理论值为20mm。将上述值代入公式(9)、(10)中,得到误差系数为: $\partial \beta' / \partial \beta = 17$ ,  $\partial \alpha' / \partial \alpha = 4$ ,  $\partial \alpha' / \partial \beta = 6$ 。

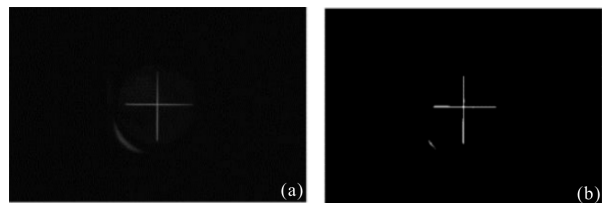


图5 (a)主眼对准经纬仪十字叉丝;(b)子眼对准经纬仪十字叉丝

Fig.5 (a) The main eye aligned at theodolite crosshairs;

(b) sub-eye aligned at theodolite crosshairs

经纬仪测得 $\alpha$ 与 $\beta$ 的实际测量角度为 $3^\circ 55' 19''$ 、 $6^\circ 44' 50''$ ,所以 $\Delta \alpha = 43''$ ,  $\Delta \beta = -10''$ ; MELOS-530 焦距

仪测量子眼实际焦距为 19.30 mm,故  $\Delta f$  为 0.7 mm。

将上述值代入公式 (11)~(13) 中,得到理论计算  $\Delta\alpha'=1'34''$ , $\Delta\beta'=2'50''$ ,所以  $\Delta=3'14''$ 。因此,经得理论计算,系统在跟踪目标时,调整自身姿态使主眼对准目标的旋转角为  $7^\circ 51'14''$ ,即通过上述理论得到的仿生复眼光学成像系统的理论旋转角度为  $7^\circ 51'14''$ ,系统的理论旋转误差为  $\Delta=3'14''$ 。在实际测量中,主要使用经纬仪互瞄的方法测量中心主眼与子眼之间夹角。对准主眼的经纬仪设为经纬仪 1,对准子眼的经纬仪设为经纬仪 2,测量数据如表 2 所示。

表 2 复眼成像系统实验角度测量数据

Tab.2 Measurement data of compound eye imaging system experimental angle

No.	Theodolite 1	Theodolite 2	Optical axis angle
1	80°49'13"	91°20'33"	7°51'14"
2	80°48'19"	91°21'27"	7°51'16"
3	80°49'13"	91°20'33"	7°51'14"

从表 2 可以看出,经实验测得的仿生复眼光学系统的总旋转角为  $7^\circ 51'14''$ ,系统的旋转角度误差为  $\Delta=3'14''$ ,与理论计算得出的旋转角度误差一致,所以该误差分析方法可行。

#### 4 结 论

文中从已有的可以实现高分辨、大视场角的复眼光学系统出发,建立了相应的数学模型,计算出旋转角度与系统各参数的数学关系,同时推导出误差方程,通过 MATLAB 对误差方程的分析,探究各误差对总旋转误差的影响,并且利用自带光源的经纬仪和步进电机等辅助仪器搭建实验,通过实验结论及分析表明,该方法精确、可行,为复眼系统的装调提供了理论精度保证,同时为以后复眼的误差分析提供了理论依据,为系统未来的工程化奠定了基础。

#### 参考文献:

[1] Jiang Xin, Gong Huixin, Ding Lei, et al. Choice of image sensor in high-speed small target imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (S2): 513-516. (in Chinese)

[2] Lei Weining, Guo Yunzhi, Gao Tingting. Study on the structure system with large field detection based on bionic compound eye [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2016, 14(3): 62-66. (in Chinese)

[3] Gong Xianwei. Study on imaging system of curved surface

biomimetic compound eye[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)

[4] Chen Mingjun, Liu Yesheng, Li Zi'ang, et al. New research progress in design and manufaure of artificial optical compound eye [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(1): 161-168. (in Chinese)

[5] Tanida J, Kumagai T, Yamada K, et al. Thin observation module by bound optics (TOMBO): an optoelectronic image capturing system[C]//International Topical Meeting on Optics in Computing, International Society for Optics and Photonics, 2000: 1030-1036.

[6] Duparré J, Schreiber P, Matthes A, et al. Microoptical telescope compound eye [J]. *Optics Express*, 2005, 13 (3): 889-903.

[7] Di Si, Xu Honghui, Du Ruxu. New progress of artificial compound eye imaging systems [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, 6(4): 93-96. (in Chinese)

[8] Zhang Hongxin, Lu Zhengwu, Wang Ruiting, et al. Study on curved compound eye imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 346-350. (in Chinese)

[9] Gong Xianwei, Yu Weixing, Zhang Hongxing, et al. Progress in design and fabrication of artificial compound eye optical system[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 34-45. (in Chinese)

[10] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, et al. Multiscale gigapixel photography[J]. *Nature*, 2012, 486(7403): 386-389.

[11] Feng Guoyu. Research on technique of image mosaic of multiple model in large view scene [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)

[12] Xu Yan, Yan Shuhua, Zhou Chunlei, et al. Advances in bionic study on insects compound eyes [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(S1): 10-12. (in Chinese)

[13] Cai Mengyin, Xu Guili. Fast bionic image mosaic method on large field of view [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 26(12): 82-84. (in Chinese)

[14] Cheng Mingjun, Liu Yesheng, Li Zi'ang, et al. New research progress in design manufacture of artificial optical compound eye [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(1): 161-168. (in Chinese)

[15] Wang Lijuan. Research on target ranging and high resolution image reconstruction based on multi-aperture imager [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[16] Fu Yuegang, Zhao Yu, Liu Zhiying, et al. Design of the bionic compound eye optical system based on field splicing method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(2): 422-429. (in Chinese)

[17] Gao Tianyuan, Dong Zhengchao, Zhao Yu, et al. Structure and Alignment of field stitching compound eye optical imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 43-48. (in Chinese)

[18] Yang Zhichao. Error Theory [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1987. (in Chinese)