

doi:10.3788/gzxb20184710.1022001

可变焦距的非球面复眼优化及定位技术

李伦¹, 郝永平¹, 刁晓蕾², 刘凤丽²

(1 沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159)

(2 沈阳理工大学 机械工程学院, 沈阳 110159)

摘 要:提出一种新型可变焦非球面人工复眼结构,该结构将曲面复眼划分为三个扇形区域,不同区域内的微透镜焦距不同,使得人工复眼能够在一定范围内实现焦距调节.通过计算及仿真分析,对各级微透镜结构进行非球面优化,优化后各级微透镜的球差值为优化前的 1/1000,提高了曲面复眼的边缘成像质量.采用模压成型工艺制备得到子眼个数为 61,基底直径为 8.66 mm 的变焦距非球面人工复眼样品,并标定各子眼的相互位置,建立多个子眼同时识别目标的定位数学模型.搭建了人工复眼成像性能测试及目标定位测试平台进行实验验证,实验表明人工复眼相机能够捕获清晰的圆形和十字型光斑图像,各扇形区域内采集的图像尺寸不同,能够实现一定范围内变焦成像.通过多个微透镜捕捉目标,利用入射角度与像点重心之间的关系解出目标点坐标,实验结果的定位误差值在 10% 以内.

关键词:光学设计与制备;仿生复眼;变焦距;非球面;视觉模型;机器视觉;目标定位

中图分类号:O439; Q692

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)10-1022001-11

Aspherical Compound Eye Optimization and Positioning Technology with Variable Focal Length

LI Lun¹, HAO Yong-ping¹, DIAO Xiao-lei², LIU Feng-li²

(1 School of Equipment, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

(2 School of Mechanical, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: A new type of aspheric artificial compound eye with variable focal length was proposed. The structure divides the curved compound eye into three fan shaped areas, and the focal length of the microlens in different areas is different, so that the artificial compound eye can achieve the focal length adjustment within a certain range. Through calculation and simulation analysis, aspheric surface optimization is carried out for the microlens structure at all levels. After optimization, the spherical difference value of each level of microlens is 1/1000 before optimization, which improved the edge image quality of curved compound eyes. The aspherical artificial compound eye sample with the number of eyes of 61 and the diameter of the base of 8.66 mm is prepared by using the molding method. Calibrating the mutual relationship between the eyes of the child and establishing a mathematical model for the simultaneous identification of multiple sub eyes. The artificial compound eye imaging performance test and target positioning test platform are built. Through experimental verification, the artificial compound eye camera can acquire clear circular and cross-shaped light spot images. The size of images collected in each sector area is different, and the zoom imaging can be realized within a certain range. By capturing the target with multiple microlenses and the relationship between the incident angle and the center of gravity of the image point, the coordinates of the target point are calculated. The experimental results show that the positioning error value is less than 10%.

基金项目:国家高技术研究发展计划 (No.2015AA042701)和总装基金项目(No.9140A05020115QT28057)资助

第一作者:李伦(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为仿生导航与控制技术.Email:408907652@qq.com

导师(通讯作者):郝永平(1960-),男,教授,博士,主要研究方向为微小引信技术及探测技术.Email:yphsit@126.com

收稿日期:2018-04-02;录用日期:2018-07-09

Key words: Optical design and fabrication; Artificial compound eye; Zoom; Aspheric; Vision models; Machine vision; Target positioning

OCIS Codes: 220.1250; 220.4000; 220.4830; 110.2970; 150.1488; 330.4060

0 引言

新型人工复眼结构在成像视场范围和成像质量方面的不断提高,使得其在多孔径成像、战场情报收集、卫星遥感图像采集、目标探测与跟踪等方面具有很大应用价值.复眼具有多个子眼球面阵列分布的结构,多个子眼可同时捕捉目标点,而且具有强大的集中处理神经信息的能力,因此非常适于对高速运动目标的识别、定位以及精准的目标识别等任务^[1-3].

昆虫复眼具有体积小、视场大,对运动物体敏感的特性^[4-5],人工复眼成像系统根据自然界中昆虫复眼的特点不断进行结构创新,许多新型的人工复眼相继被提出.加拿大约克大学 Hornsey R 等人设计了利用可弯曲光纤束将图像从曲面转化到平面的蜻蜓眼(Dragonfly Eye)结构^[6],该结构采用多根成像光纤束采集对应方向的图像信息,最后将对应光纤束获得的图像传导到一片面积较大的图像传感器上.该研究小组利用该结构复眼对二维平面开展了跟踪实验,结果表明在距离系统 800 mm 的地方,实际目标位置与理想目标位置之间的平均误差为 0.7 mm.但该结构安装制作等方面还存在较大困难.2012 年,美国杜克大学研制了一款名为 AWARE-2^[7-8] 的超高像素相机,每分钟采集三帧图像,相机视场角 $120^\circ \times 50^\circ$,解析度是人眼的 5 倍,能够清晰地拍到 800 米以外的物体.2013 年,欧洲有研究小组研制了一个无畸变的机械柔性成像器-曲面人造复眼(Curved Artificial Compound Eyes, CurvACE)^[9],该款相机将光学层和探测器以微米的精度对准并粘和,然后采用切割的方式将堆叠结构精确分离至柔性互联状态,最后连接柔性结构到基板上完成整个系统装配.共有 42×15 个子眼,每个透镜直径 $172 \mu\text{m}$.CurvACE 采样带宽达到 300Hz,可以减少快速移动期间的运动堆叠.2013 年,美国 Song^[10-11] 等人将弹性复合光学元件与可变性光电检测器件阵列组合集成并弯曲为半球状作为数字成像组件,利用硅胶制作的顶部穿孔板和底部支撑件消除杂光,并连接形成完整的复眼装置.采用聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)制作微透镜,图像探测器由大小 $160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$ 的硅光电二极管组成,该装置具有无限景深并消除了离轴像差.复眼的仿生过程最大的挑战是现有的平面传感器技术和常规的光学器件不能满足设计要求^[12],而且现有的工艺和加工方法对在实现曲面复眼的制作时存在着工艺复杂、条件严苛、成本高昂等问题^[13].非均一曲面复眼结构能够有效解决曲面复眼利用平面传感器接收图像时边缘子眼无法成像的问题^[14],但非均一曲面结构仍然存在着成像质量不佳、无法变焦等问题.

本文提出的新型变焦距非球面人工复眼结构将曲面复眼划分为几个不同的成像区域,不同成像区域内子眼的焦距不同,使得人工复眼能够在一定范围内实现焦距调节.通过 ZEMAX 对微透镜进行非球面优化,降低微透镜的球差,同时对复眼模型进行光线追迹,验证变焦距非球面曲面复眼的成像性能.提出多目定位算法,通过标定变焦距曲面复眼三维模型中每个子眼位置,利用最小二乘法解超定性方程组得到目标点的三维坐标.采用模压成型工艺制备得到人工复眼,搭建复眼成像定位实验系统,对系统的成像性能和目标定位准确度进行测试.

1 可变焦距曲面人工复眼非球面优化设计

随着加工工艺水平的不断进步,国内外对昆虫复眼的研究有了较大进步^[15-16],其中非均一曲面复眼能够有效解决各个子眼聚焦不准确的问题,如图 1 所示单层非均一曲面复眼模型的 ZEMAX 光线追迹图.根据追迹结果可以发现,各级子眼对应的入射光线都可以聚焦到光探测靶面上,由于各级微透镜的表面结构为球面,导致复眼模型存在较大球差,影响整体的成像效果,进而对后期利用复眼进行目标跟踪与多目定位产生较大的影响,因此对各级微透镜进行非球面优化,以提高复眼整体成像质量.

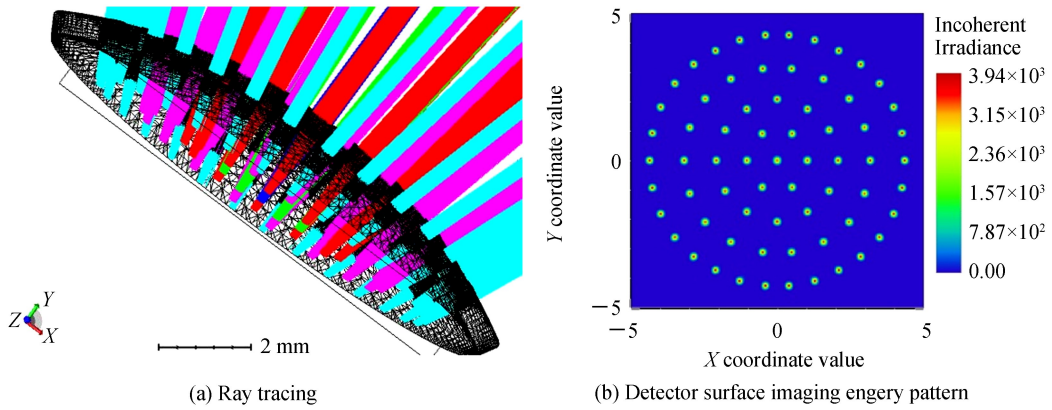


图1 非均一曲面复眼 ZEMAX 仿真追迹结果
Fig.1 Non-uniform surface compound eye ZEMAX simulation trace results

1.1 可变焦距曲面人工复眼结构设计

变焦距曲面人造复眼的整体结构如图 2(a), 将曲面基底平均分成三部分, 每一部分的角度是 120° , 对应的“焦距”各不相同, 在设计中分别取红色、黄色和绿色区域的中心主小眼的焦距为 2.227 mm, 1.927 mm 和 2.527 mm. 这就可以在一定范围内实现变焦, 增强人造复眼的成像性能。

曲面基底上的微透镜阵列最终都在平面光探测阵列上成像, 这使得基底上不同位置的微透镜中心到光探测阵列的距离不同, 而根据几何成像原理, 微透镜的有效焦距长与微透镜中心到光探测阵列的距离相等, 因此只有每一区域的相同位置的微透镜才具有相同的尺寸. 结构中除了红色区域多一个中心透镜外, 三个区域的其他微透镜阵列相对位置和数量相同。

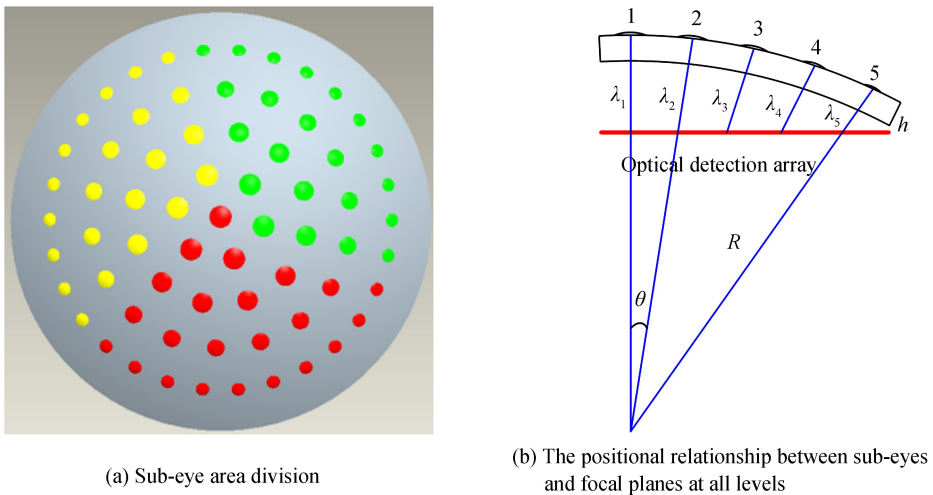


图2 可变焦距曲面复眼区域划分和位置关系
Fig.2 Variable focus surface compound eye area division and relationship with location

可变焦距曲面复眼结构设计参数如表 1.

表 1 复眼结构设计参数
Table 1 Compound eye structure design parameters

Base radius	Angle between adjacent microlenses	Center to edge angle	Material	Refractive index
4.5	6°	24°	PDMS	1.41

1.2 子眼微透镜尺寸计算及优化

以中心子眼的光心到光探测器靶面的距离作为设计基准, 各级微透镜中心到光探测阵列的距离为各子眼的有效焦距. 以红色区域内的子眼阵列为例, 如图 2(b), 由于多个子眼阵列排布在曲面基底上, 根据每个子眼与中心子眼的偏转角度, 将其分为 5 级, 每级上的子眼到光探测器靶面的距离相同, 偏转角度也相同, 因此, 每级上的子眼的有效焦距和曲率半径也相同。

根据透镜曲率半径、各级子眼的偏转角度之间的几何关系可解算得到各级子眼的有效焦距.首先确定各级子眼中心到光探测器靶面的距离,即第 n ($n \leq 5$) 级子眼中心对应的基底内表面到光探测器靶面的距离 λ_n ,其表达式为

$$\lambda_n = R - \frac{R - (\lambda_0 + h)}{\cos(n\theta)} \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (1)$$

各级子眼的有效焦距可根据薄透镜制造公式得到,即

$$\frac{1}{f_n} = (n_i - 1) \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{R} \right) \quad (2)$$

式中, f_n 为第 n 级子眼的有效焦距, r_n 为第 n 级子眼的曲率半径, R 为曲面基底半径, n_i 为制作曲面复眼所选材料的折射率.根据式(2),可得到红色区域内各级子眼的有效半径初始值,如表 2.

表 2 计算得到的各级子眼初始参数

Table 2 Calculated levels of sub-eye initial parameters

Sub-eye level	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
r_n /mm	0.946	0.894	0.829	0.709	0.528
f_n /mm	2.227	2.173	2.009	1.724	1.302

根据计算得到的各级子眼初始参数,在 ZEMAX 中建立曲面复眼的参数化模型,并对子眼进行光线追迹,对各级子眼的成像性能进行研究.以 1 级子眼的光线追迹结果分析,可以看出子眼虽然能够成像,但是成像并不能较好地汇聚成一个点,如图 3(a).从光扇图(ray fan)中可以发现,初始结构存在着较大的球差,且光线像差为 $6 \mu\text{m}$;从点列图中可以看出艾利(Airy)衍射斑弥散半径均方根半径是 $3.328 \mu\text{m}$,较为分散,影响微透镜的成像效果.

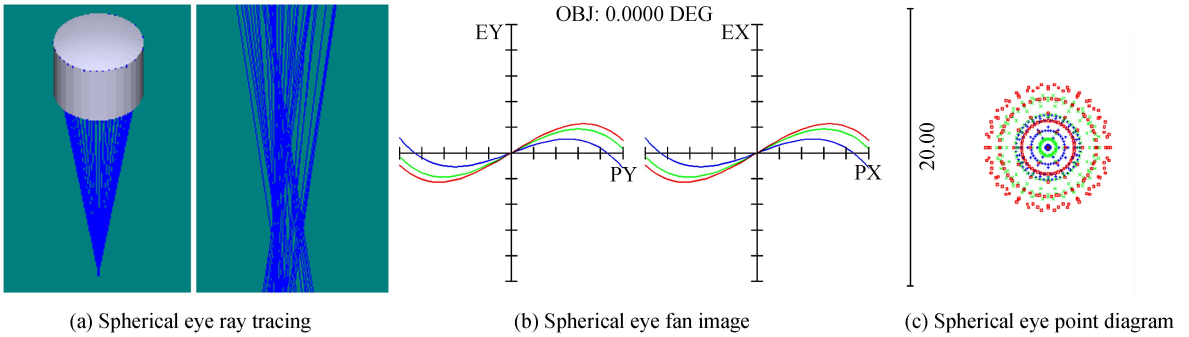


图 3 球面子眼 ZEMAX 仿真结果
Fig.3 Spherical sub-eye ZEMAX simulation results

为得到最佳成像质量,需对子眼结构进行非球面优化.分析子眼结构,将子眼的曲率半径作为优化变量.建立目标优化函数、有效焦距 EFFL、球差 SPHA、调制传递函数 MIFT,设置优化目标值与权值,通过优化各级子眼的曲率半径,降低子眼的球差,得到最佳的成像质量.

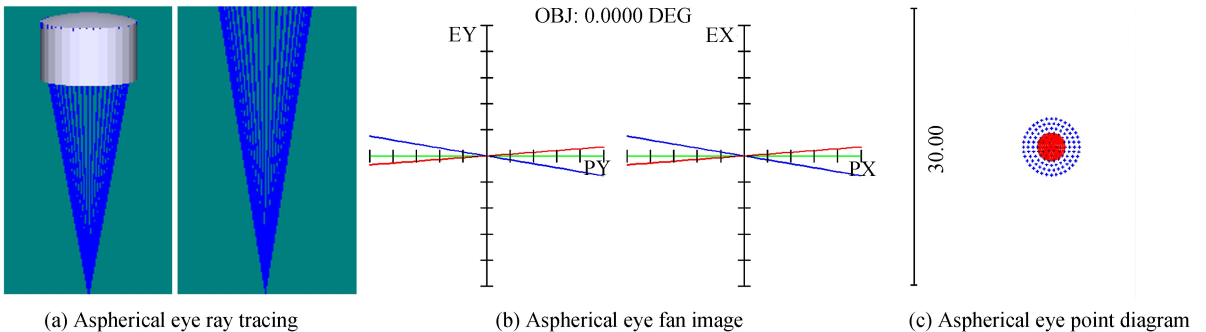


图 4 非球面子眼 ZEMAX 仿真结果
Fig.4 Aspherical sub-eye ZEMAX simulation results

经过优化, 子眼表面变为非球面结构, 如图 4. 通过 ZEMAX 光线追迹结果发现, 光线通过非球面子眼聚焦后很好地聚焦成一点, 没有发生光线发散的现象. 同时, 分析非球面子眼的光扇图得出, 透镜的球差得到了很大改变, 且子眼像差降低到约为 $2 \mu\text{m}$, 如图 4(b); 观察非球面子眼点列图得出, 艾利 (Airy) 衍射斑弥散半径均方根半径为 $1.519 \mu\text{m}$, 相对集中, 有利于提高子眼透镜的成像质量.

将子眼表面由球面变为非球面, 各级子眼的球差降低为初始结构的百分之一, 同时像差也有所降低, 但非球面子眼结构对后期曲面复眼模具的加工工艺水平提出了更高的要求. 表 3 为红色区域子眼透镜优化前后的球差值.

表 3 各级子眼透镜优化前后的球差值

Table 3 The ball difference value before and after the optimization of the sub-eye lens at all levels

Sub-eye level	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Pre-optimization/ μm	2.911	3.174	2.955	2.662	2.205
Post-optimization/ μm	0.023	0.020	0.019	0.067	0.037

表 4 是优化后红色区域非球面微透镜的各个尺寸, 从 ZEMAX 中导出相应的模型后, 装配到曲面基底相应的位置, 即可构成具有三个“焦距”微透镜阵列.

表 4 非球面子眼微透镜的尺寸参数

Table 4 Aspherical sub-eye microlens size parameters

Sub-eye level	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Focal length/mm	2.227	2.173	2.009	1.724	1.302
Sub-eye surfaceradius of Curvature/mm	0.929 8	0.910 2	0.895	0.694	0.514 9
Numerical aperture/mm	0.638	0.624	0.59	0.501	0.382
Height/mm	0.056 1	0.052 0	0.048 9	0.043 2	0.034 5

1.3 优化后可变焦距复眼成像分析

优化后, 建立曲面复眼模型, 利用 ZEMAX 对曲面模型中 1~5 级的子眼微透镜光线追迹. 分析各级子眼的光斑尺寸和光线聚集情况, 通过不断优化得到各级子眼最佳的成像质量, 优化后各级子眼的光线聚焦核能量光斑如图 5.

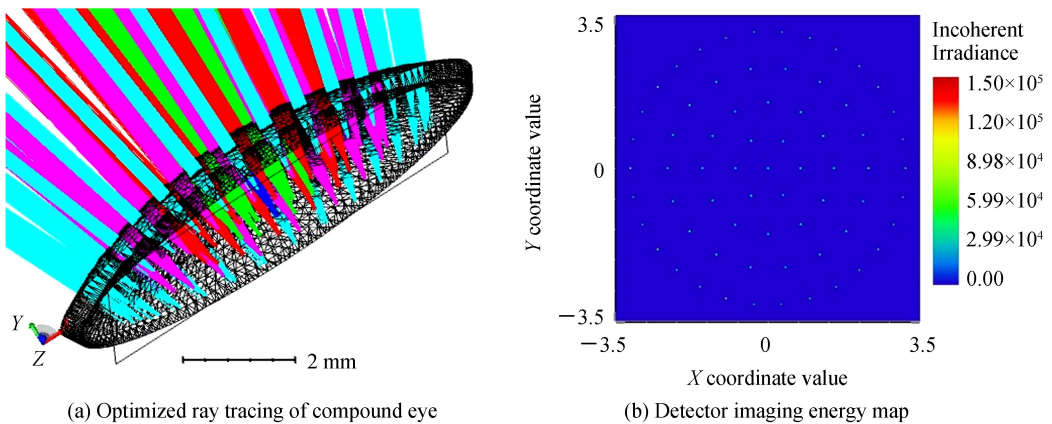


图 5 非球面变焦距曲面复眼模型光线追迹

Fig.5 Aspherical zoom surface compound eye model ray tracing

对比图 1 的光线追迹结果可以发现, 优化之前, 各级子眼聚焦光斑尺寸较大, 光线比较发散, 分析得到的峰值辐照度仅为 $3.937 2 \times 10^3 \text{ watts/cm}^2$; 优化后各子眼的光线聚焦程度更好, 且各级子眼在探测器上的光斑能量更强, 峰值辐照度达到 $1.48 \times 10^5 \text{ watts/cm}^2$, 说明光线聚焦能量集中, 提高了各级子眼的成像质量, 为图像的目标识别与定位奠定了良好的基础.

2 可变焦距非均一曲面复眼的制备

近年来微透镜阵列的制作取得了很大进步, 其中 MEMS 硅工艺微制造加工技术成为主流趋势, 在微纳

方向的主要制造方法包括灰度光刻法、反应离子刻蚀法、玻璃刻蚀法、金刚石切削法、光敏玻璃热成型法、电子束和激光直接写法、光刻胶熔融法等。其中大部分制作方法可以实现平面微透镜阵列的制作,而制作曲面微透镜阵列则存在着许多困难。采用模塑成型的方法可以简单、快速地制作曲面微透镜阵列。

2.1 可变焦距曲面人工复眼模具

变焦距曲面复眼模具利用精密五轴数控机床一体加工成型,各级微透镜的位置及尺寸偏差小于 0.02 mm。为加快成型材料的固化速度,提高成型速度,在模具上加工加热口,采用加热装置对模具进行加热,同时便于控制模具本身的温度,使模具保持 PDMS 固化的最佳温度,如图 6(a)。

对加工后的模具采用电解抛光的方式对模具进行镜面抛光,选择性的溶解模具加工后材料表面微小的凸起部分,使表面光滑。抛光过程分为两步:

- 1) 宏观整平溶解产物向电解液中扩散,材料表面几何粗糙度下降, $R_a > 1 \mu\text{m}$ 。
- 2) 微观平整阳极极化,表面光亮度提高, $R_a < 1 \mu\text{m}$ 。

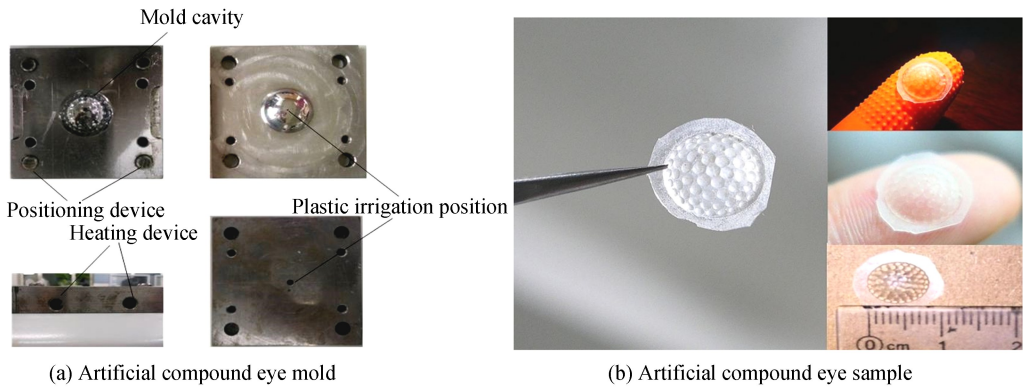


图 6 曲面人工复眼模具及人工复眼样品

Fig.6 Curved surface compound eye mold and artificial compound eye sample

2.2 可变焦距曲面人工复眼制备

分析不同材料之间的特性,选择聚二甲基硅氧烷即 PDMS 作为成型材料。这种材料与模具之间具有较低的分子力,可从模具表面轻松的分离下来。为保证曲面微透镜列表面的光洁度,模具表面需用超纯水进行冲洗,之后利用丙酮和乙醇进行清洗,放入烘箱进行烘干后方能进行注胶操作。

将固化剂与 PDMS 按照不同的配比测试最佳的溶液配比,选择配比 1 : 10 的配比方案配置溶液,利用压力注射装置将配置好的材料通过胶口处灌注到模具中,然后放入烘箱中进行固化,固化温度为 80° ,为减少模具内气泡的数量,避免气泡干扰曲面微透镜阵列上的各个子眼,延长固化时间,固化时间为 10 h。固化后,将其从烘箱中取出,将模压成像的曲面微透镜阵列取出,如图 6(b)。固化成型后的曲面人工复眼,在曲面微透镜边缘位置处,存在许多气泡,但对曲面微透镜整体没有影响,可通过后期处理将边缘处的气泡去除而不对人工复眼造成影响。

为验证制备得到的曲面复眼成品的成像性能,搭建成像测试平台如图 7(a)。系统主要由集束光源(可调节光圈大小)、掩模板(十字、圆形光阑)、透镜、曲面复眼相机和 PC 组成。调整曲面复眼相机与光源之间的距离,获得最佳的成像质量。图 7(b)为光源通过圆形光阑采集的光斑图像,从图像中可以看出,各级子眼能够获得明亮的圆形光斑图像。对比分析同一级上三种不同区域内的光斑尺寸,利用图像处理软件 ToupView 对复眼采集的图像进行分析,图 7(d)是将三种不同颜色区域内子眼成像分为 A、B、C 三个区域,分别测量对应区域内子眼光斑尺寸。A、B、C 三区域内各级上子眼成像光斑尺寸如表 5。

表 5 A、B、C 区域内各级子眼光斑尺寸

Table 5 Sub-apera spot size at all levels in A, B and C regions

Region	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
A	6.223 5	5.821	5.251	4.885
B	5.613	4.184	3.905	3.685
C	5.75	4.646	4.297	4.306

利用十字型光阑进行成像时(复眼相机外部加装外壳, 透光孔为长方形), 各级子眼能够获取十字型光斑图像, 如图 7(c), 但是由于光阑尺寸较大, 造成各级子眼能量较为集中, 通过分析采集的十字型光斑图像, 发现不同区域内的光斑清晰度不同. 由此可得, 三种不同焦距的子眼能够实现一定范围内的变焦距成像.

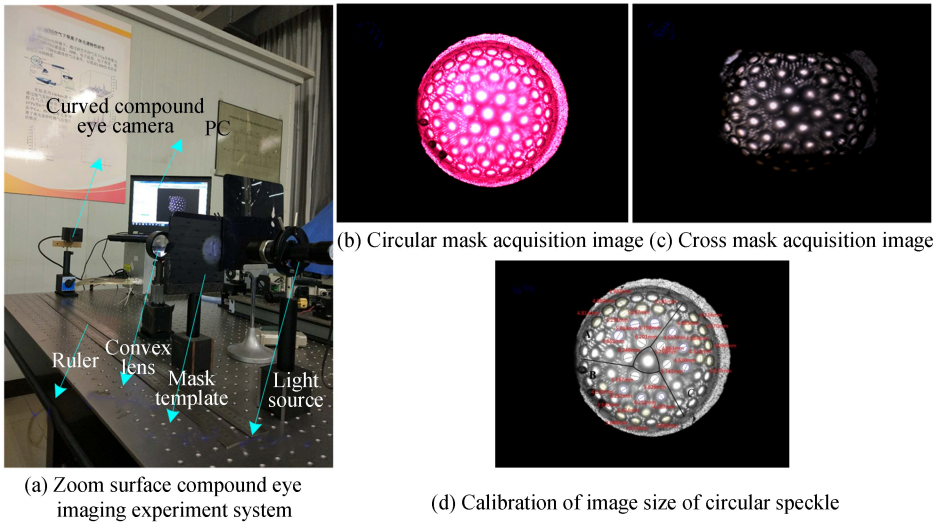


图 7 变焦距曲面复眼成像实验系统及成像分析
Fig.7 Zoom surface compound eye imaging experiment system and imaging analysis

3 多目定位数学模型

根据目标成像定位机理, 目标点、子眼透镜中心及目标物像点中心三者共线. 若曲面复眼上的多个子眼能够同时捕获到目标点并获取清晰图像, 则目标像点中心及其对应的子眼透镜中心的连线的交点处即为目标点位置. 但在实际成像过程中, 由于各级子眼透镜存在像差以及制备曲面复眼时存在加工误差等因素, 导致曲面复眼成像过程中不可避免地存在着非线性畸变, 1~5 级子眼所产生的非线性畸变逐渐增加.

由于曲面复眼成像存在着畸变, 直接建立物像之间的校正数学模型较为困难. 因此, 将该问题分成两部分, 分别建立目标点与子眼透镜间的线性方程和子眼透镜和目标像点之间的对应关系, 如图 8(a). 利用建立的两种数学模型解算目标点的空间坐标.

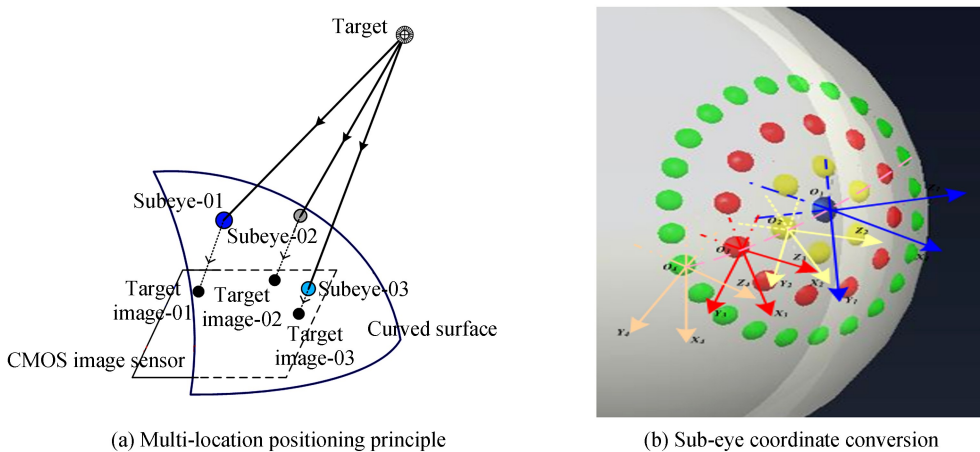


图 8 人工复眼多目定位原理图
Fig.8 Artificial compound eye multi-positioning principle

如图 8(b), 子眼透镜中心坐标 $P_{oi}(X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi})$, 目标点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$, 两点间的方向向量 \mathbf{p} 可以表示为 $p(\tan \alpha, \tan \beta, 1)$, 令 $p'(a, b, c) = p(\tan \alpha, \tan \beta, 1)$, 其中 $a = \tan \alpha$, $b = \tan \beta$, $c = 1$, 则子眼透镜与目标点之间的关系可以表示为

$$\frac{X_i - X_{oi}}{a_i} = \frac{Y_i - Y_{oi}}{b_i} = \frac{Z_i - Z_{oi}}{c_i} \quad (3)$$

式中, (X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}) 分别为各级子眼透镜中心的世界坐标, $i=1, 2, \dots, 61$.

计算时, 定义曲面复眼中的 1 级子眼的坐标系为世界坐标系, 2~5 级子眼与 1 级子眼光轴存在着偏转角度, 为了计算时统一, 需要将 2-5 级子眼的坐标系与主坐标系进行统一, 如图 8(b). 数学模型中的坐标系转换遵循欧拉变换法则.

由欧拉角的转换关系可得 2~5 级子眼坐标系到主坐标系的旋转矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos y & -\cos q \sin y & \sin y \sin q \\ \sin y & \cos y \cos q & -\sin q \cos y \\ 0 & \sin q & \cos q \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, 旋转角 ψ 是 2~5 级子眼坐标系与 Z 轴的夹角, 旋转角 θ 是子眼坐标系与 Y 轴的夹角.

因此, 可推导出子眼坐标系下各级子眼对应的方向向量 \mathbf{p}' 与其对应的世界坐标系下的方向向量 \mathbf{p} 之间的关系式为

$$\mathbf{p} = \mathbf{M}\mathbf{p}' \quad (5)$$

在已知各子眼透镜中心的世界坐标和子眼透镜对应的世界坐标系的方向向量 \mathbf{p} , 世界坐标系下目标点和透镜之间的线性公式根据式(3)可得

$$\begin{cases} A_{i1}x + B_{i1}y + C_{i1}z + D_{i1} = 0 \\ A_{i2}x + B_{i2}y + C_{i2}z + D_{i2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

若目标点能够同时被 n 个子眼所捕获, 则目标点和子眼透镜之间的关系可以表示为

$$\mathbf{R}\mathbf{X} = \mathbf{D} \quad (7)$$

其中矩阵 \mathbf{R} 、向量 \mathbf{X} 和 \mathbf{D} 分别为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & C_{11} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n2} & B_{n2} & C_{n2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = [x, y, z]^T; \quad \mathbf{D} = [-D_{11}, -D_{12}, \dots, -D_{n1}, -D_{n2}] \quad (8)$$

求解该超定方程组, 若 \mathbf{R} 满秩, 令 $\mathbf{N} = \mathbf{R}^T \mathbf{R}$, 则空间中任意点的三维坐标可表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{D} \quad (9)$$

4 人工复眼定位实验

系统主要由人工复眼、CMOS 探测器、分光器、激光光源与目标靶面等组成, 如图 9. 人工复眼与 CMOS 装配, 以复眼中心子眼的焦距作为调节标准, 调整曲面人工复眼到 CMOS 光探测器表面的距离, 使得各级子眼能够获得清晰像. CMOS 光探测阵列用来接收目标点多通道成像, 将采集到的图像输出到 PC 上做进一步处理.

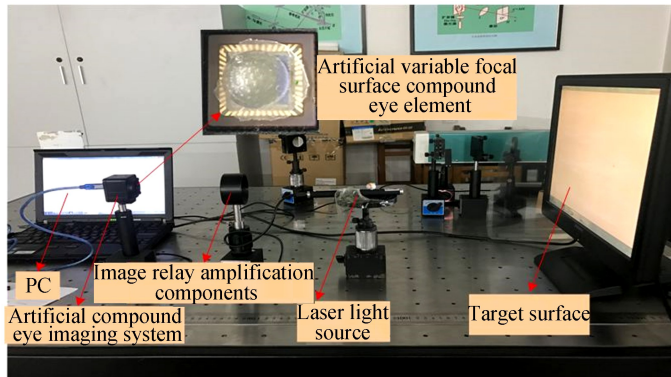


图 9 人工复眼定位实验系统

Fig.9 Artificial compound eye positioning experiment system

图像采集 CMOS 感光面尺寸为 $6.55 \text{ mm} \times 4.92 \text{ mm}$, 有 2048×1536 个有效像素, 每个像素单元尺寸 $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$, 将各方向采集的图像输出到计算机上进一步处理.

为了便于确定目标定位过程中子眼透镜的坐标, 需对每个子眼透镜进行编号. 复眼透镜编号如图 10(a).

搭建人工复眼定位实验系统, 根据实验条件, 若要获得目标的三维坐标, 需满足: 1) 水平轴线移动与目标平面垂直; 2) 目标平面与人工复眼平面平行; 3) 人工复眼主通道透镜光轴与目标平面的交点以及主透镜中心与交点的距离一致。

已知目标光源的坐标, 进行实验, 采集的各子眼成像信息如图 10(b)。

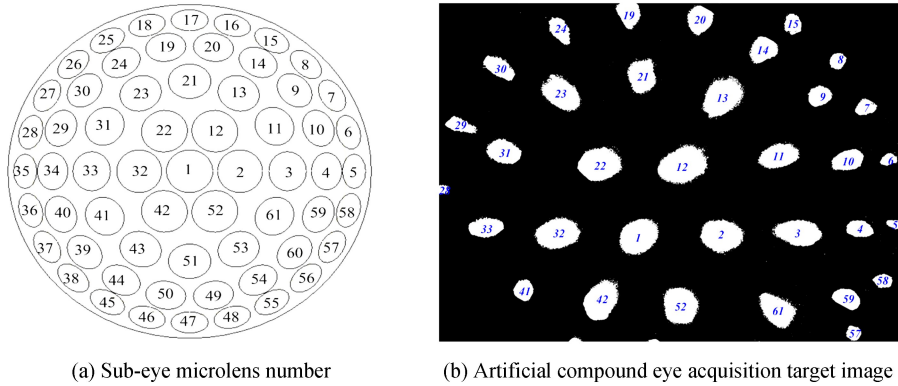


图 10 人工复眼成像通道编号及图像采集

Fig.10 Artificial compound eye imaging channel number and acquisition image

通过实验, 采集到目标点成像的子眼个数有 33 个, 为剖析变焦距曲面复眼成像系统中同一目标的定位误差, 在标定过程中, 以变焦距曲面复眼球壳中心为原点, 在空间位置上设定目标点坐标为 P_0 (18.6 mm, 12.52 mm, 85 mm)。由式(3)~(9)可知, 如果目标点被两个及以上的子眼通道捕捉到, 就可根据组成的超定性方程组确定它的三维坐标, 因此提取这 20 个透镜中的任意 2 个、3 个、4 个、...、20 个(1~20 成像通道)子眼通道分别解算空间目标点 P_0 的三维坐标, 计算结果如表 6。

表 6 计算后目标点坐标值

Table 6 Calculate target point coordinate value

Capture the number of target points	Target point coordinates	X direction error	Y direction error	Z direction error
2	(8.481 30, 4.373 5, 35.682 3)	54.40%	65.06%	58.02%
3	(8.767 80, 5.024 3, 38.329 5)	52.86%	59.86%	54.90%
4	(9.398 70, 5.514 3, 40.067 4)	49.46%	55.95%	52.86%
5	(9.594 50, 5.566 3, 41.822 0)	48.41%	55.54%	50.79%
6	(10.302 2, 5.710 1, 42.629 1)	44.61%	54.39%	49.84%
7	(9.446 4, 5.407 1, 43.284 7)	49.21%	56.81%	49.07%
8	(10.220 8, 5.669 6, 43.518 0)	45.04%	54.71%	48.80%
9	(11.149 3, 6.025 4, 46.306 6)	40.05%	51.87%	45.52%
10	(12.839 4, 6.257 7, 48.862 6)	30.97%	50.01%	42.51%
11	(13.962 1, 6.263 2, 49.204 6)	24.93%	49.97%	42.11%
12	(13.868 2, 6.256 4, 49.037 5)	25.43%	50.02%	42.30%
13	(13.986 7, 6.366 6, 49.326 6)	24.80%	49.15%	41.96%
14	(14.941 1, 6.869 0, 50.826 8)	19.67%	45.13%	40.20%
15	(14.816 6, 7.496 9, 57.840 6)	20.34%	40.12%	31.95%
16	(15.216 9, 8.829 9, 60.582 3)	18.18%	29.47%	28.72%
17	(15.693 3, 8.948 70, 60.898 3)	15.62%	28.52%	28.35%
18	(16.230 7, 9.786 9, 65.732 9)	12.73%	21.82%	22.66%
19	(16.440 9, 10.344 2, 74.253 0)	11.60%	17.37%	12.64%
20	(16.853 9, 10.889 3, 78.716 2)	9.38%	13.02%	7.39%

从表 6 计算得到的目标点坐标中可以发现, 解算出的目标点坐标值 X、Y、Z 三个方向上的误差随着捕获目标子眼个数的增加而逐渐减少, X、Y、Z 三个方向上的误差变化曲线如图 11。分析曲线趋势可以得到, 捕获目标点的子眼个数小于 20 个时, 此时解算出的目标点坐标误差较大, 当捕获目标子眼的数目达到 20 个以

上时,通过曲面复眼定位模型解算得到的目标物三维坐标的误差能够降低到10%以内。

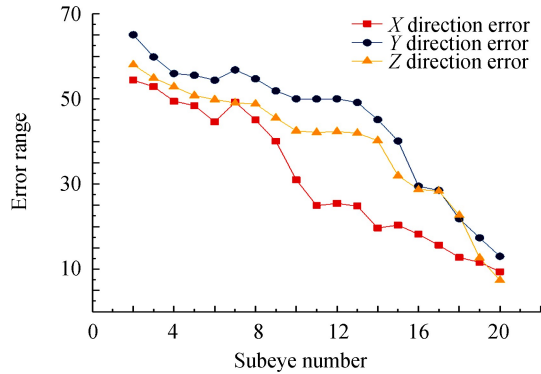


图11 目标点三维坐标误差曲线

Fig.11 Target point three-dimensional coordinate curve

5 结论

从非均一曲面复眼的各级子眼存在较大球差且成像质量不佳等问题出发,通过非球面优化,将各级子眼的球差值降低为初始结构的1/1 000,接着将整体复眼划分为三个不同区域,以实现一定范围内的变焦成像.实验表明,采用不同形状的掩模板,非均一曲面复眼的各级子眼均能够采集到清晰的光斑图像,对采集的图像进行标定,三个区域内采集的光斑图像尺寸并不相同,实验结果证明三个区域内的子眼的焦距不同,能够实现一定范围内的变焦成像.最后研究了曲面复眼多目定位算法,利用多个子眼捕捉目标及入射角度与像点重心之间的关系,计算得到目标点坐标.计算结果表明,复眼相机捕获目标点的子眼个数越多,其定位精度越高,当捕获子眼数超过20个时,其定位精度能够在10%以内.由于曲面复眼加工误差、目标点测量误差、目标靶面与复眼相机之间的距离误差等多方面的原因,导致解算出的目标点坐标存在的误差偏大,通过调整实验条件、优化模型算法对误差进行修正.下一步期望能完善曲面复眼的制备工艺,提高加工精度以进一步提高所有位于视场内目标的成像质量.优化定位模型算法,提高目标定位精度.本文设计的变焦距曲面复眼及复眼多目定位方法可为医疗成像、仿生导航和机器人视觉等应用提供理论依据.

参考文献

- [1] HAO Yong-ping, LI Lun. New progress in structure design and imaging systems of artificial compound eye[J]. *Laser&Infrared*, 2015, **45**(12):1407-1412.
郝永平,李伦.仿生复眼结构设计及其成像系统研究新进展[J].激光与红外, 2015, **45**(12): 1407-1412.
- [2] CHEN Cheng, LIANG Jing-qiu, LIANG Zhong-zhu, et al. Design and analysis of the expansion compound eye used in micro-miniature statics fourier transform infrared spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(11):268-276.
陈成,梁静秋,梁中翥,等.微小静态傅里叶变换红外光谱仪中复眼缩束系统的光学设计及仿真研究[J].光学学报, 2015, **35**(11):268-276.
- [3] HAO Yong-ping, LI Lun, YU Jun-bo. Design and preparation of aspherical compound eye[J]. *Laser&Infrared*, 2016, **46**(6):727-730
郝永平,李伦,于军波.非球面复眼设计及其制备工艺研究[J].激光与红外, 2016, **46**(6): 727-730.
- [4] 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,曹秀秀,等.基于大视场人工复眼定位技术[J].光子学报, 2016, **45**(5):0512003.
- [5] ZOU Cheng-gang. Optical design and simulation of the artificial compound eyes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
邹成刚.仿生复眼的光学设计与模拟仿真[D]天津:天津大学, 2013.
- [6] LEE H N, JANG H, PARK S, et al. COMPU-EYE: a high resolution computational compound eye[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(3):2013.
- [7] BRADY D J, GEHM M E, STACK R A, et al. Multiscale gigapixel photography[J]. *Nature*, 2012, **486**(7403): 386-389.
- [8] MARKS D L, BRADY D J. Wide-field astronomical multiscale cameras[J]. *Astronomical Journal*, 2013, **145**(5):1069-1094.
- [9] FLOREANO D, PERICET-CAMARA R, VIOLLET S, et al. Miniature curved artificial compound eyes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(23): 9267-9272.

- [10] SONG Y M, XIE Y Z, MALYARCHUK V, *et al.* Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye[J]. *Nature*, 2013, **497**(7447):95-99.
- [11] LI Z W, XIAO J L. Mechanics and optics of stretchable elastomeric microlens array for artificial compound eye camera [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **117**(1),557.
- [12] 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**(03): 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.
- [13] CAO Zhao-lou, ZHAN Zhen-xian, WANG Ke-yi. Structure design of spherical compound eye lens for moving objectdetection[J]. *Infrared and Laser 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.
- [14] HAO Yong-ping, ZHAOLong-fei, ZHANG Jia-yi. Optimal research of aspherical zoom curved compound eye[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(1): 157-161.
郝永平,赵龙飞,张嘉易.非球面变焦距曲面复眼的优化研究[J].红外与激光工程,2015, **44**(1): 157-161.
- [15] 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正[J].光学·精密工程,2012, **20**(5): 913-920.
- [16] ZHANG K, JUNG Y H, MIKAEL S, *et al.* Origami silicon optoelectronics for hemispherical electronic eye systems. [J] *Nature Communications*, 2017, **8**(1), 1782.

Foundation item: National High-tech Research and Development Plan (No.2015AA042701) and General Equipment Department Fund Projects (No.9140A05020115QT28057)

引用格式:LI 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