

大视场曲面仿生复眼光学系统设计

胡雪蕾, 高明*, 陈阳

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 为了解决传统成像系统存在的大视场与高分辨率不可兼得的问题, 设计了大视场曲面仿生复眼光学系统。首先, 针对所采用的间隔型圆周分层微透镜阵列排布方式, 建立了一种曲面仿生复眼光学系统成像原理数学模型; 再使用微透镜阵列与转像系统相结合的成像方案解决了微透镜阵列所成的曲面像与平面探测器不匹配的问题; 并使用光学设计软件对该系统进行仿真分析及公差分析。设计得到的曲面仿生复眼光学系统总视场为 152° , 组合系统的焦距为 61.14 mm, 角分辨率为 $2.304''$, 系统总长为 16.39 mm。相对传统的大视场成像系统而言, 此曲面仿生复眼成像系统的畸变更小、分辨率更高。

关键词: 复眼; 仿生设计; 曲面微透镜阵列; 大视场

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0114002

Design of curved bionic compound eye optical system with large field of view

Hu Xuelei, Gao Ming*, Chen Yang

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: To solve the problem that the large field of view and high resolution of the traditional imaging system can not be achieved simultaneously, a large field of view curved bionic compound eye optical system was designed. Firstly, aiming at the arrangement of the spaced-type circumferential layered micro-lens array, a mathematical model of the imaging principle of the curved bionic compound eye optical system was established. The imaging scheme that combining the microlens array and the transferring image system was proposed to solve the matching problem of curved surface image which formed by the micro-lens array and the planar detector; and optical design software was used for simulation and tolerance analysis. The designed curved bionic compound eye optical system has a total field of view of 152° , a combined focal length of 61.14 mm, an angular resolution of $2.304''$, and a total length of 16.39 mm. Compared with the traditional large field of view imaging system, the curved bionic compound eye imaging system has smaller distortion and higher resolution.

Key words: compound eye; bionic design; curved micro-lens array; large field of view

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 陆军装备部预研项目(301XXX102); 陕西省教育厅重点实验室基金(17JS052)

作者简介: 胡雪蕾 (1994-), 女, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。Email: H18792780200@163.com

导师简介: 高明 (1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学设计、光电测试技术等方面的研究。Email: minggao1964@163.com

0 引言

仿生复眼成像系统是模仿生物复眼的原理和结构而设计,其相对于传统成像系统而言,具有结构紧凑、视场角大、对运动目标探测灵敏度高^[1]等优势,在大视场成像、军事目标的探测识别、导航定位^[2-3]等领域都有着广阔的发展前景。这一研究方向吸引着越来越多的研究机构开始深度剖析仿生复眼光学系统的工作原理及结构,探究其更多的功能。

日本的 TANIDA 团队提出的平面复眼成像系统 (Thin Observation Module By Optics, TOMBO)^[4],其构成的微透镜阵列平面型,与分隔层、图像接收器组成整个系统,但由于使用的平面微透镜阵列每个通道的方向都相同^[5],使其视场角大小受到限制;斯坦福大学使用多相机曲面排布^[6]来模仿生物复眼结构,该系统虽然扩大了视场,但采用大量相机使其体积变大、数据量变大,导致处理速度变慢;Floreano 等^[7-8]将包含 630 个人工子眼的 42 行矩形阵列沿着矩形的长边折成曲率半径为 6.4 mm 的曲面,此子眼阵列被称为 CurveACE (Curved Artificial Compound Eye),能够实现 180°×60°的视场角,但其结构非常复杂。长理工付跃刚等^[9]设计了在球面上分布的 31 个子系统阵列组成的仿生复眼光学系统,全视场为 53.9°,并提出了子眼视场拼接模型,但该系统视场较小;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所史成勇^[10]提出仿生复眼工作原理,设计的微透镜仿生曲面复眼系统视场角为 122.4°,但其所给计算模型太宽泛。

针对现有仿生复眼成像系统存在的问题,在分析已有研究成果的基础上,基于间隔型圆周分层排布的曲面微透镜阵列,提出其参数计算原理模型;利用该计算模型得出系统参数,并设计曲面微透镜阵列与转像系统相结合的大视场曲面仿生复眼光学系统;使用光学设计软件对该系统进行仿真分析,最终得到的曲面仿生复眼光学系统弥补了以往复眼成像系统分辨率低以及传统的成像系统视场小的缺陷。

1 曲面仿生复眼成像原理分析

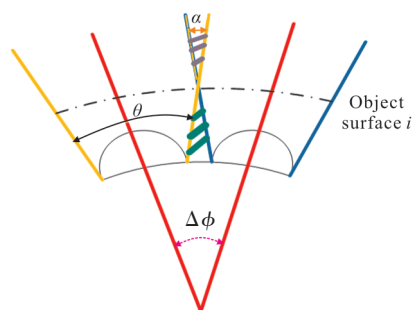
曲面仿生复眼成像系统主要由曲面微透镜阵列

和成像探测器组成。曲面微透镜阵列中各个微透镜的光轴沿不同方向分布可以采集各个方向的光线,能够有效增大复眼的整体视场。每个微透镜将来自物空间一个小立方角内的光线会聚到成像探测器上,计算机将探测器上接收到的各部分像进行信息处理使其整合为整体像。

1.1 微透镜阵列排布

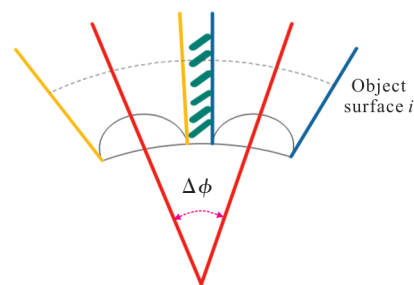
微透镜在基底上的排布方式对系统的成像质量有着重要影响。文中采取圆周阵列排布方式将 M 个光学参数和结构参数一致的微透镜分布在曲率半径为 $R(R \leq 10 \text{ mm})$ 的基底上,圆周阵列排布方式使不同微透镜的光轴之间形成一定的夹角。为了使所获得的图像不存在成像盲区且不同孔径所成的像之间有一定程度的重叠,以利于后续图像处理^[11]。子眼的视场角 θ 与相邻子眼光轴间的夹角 $\Delta\phi$ 应满足一定的关系,两者之间的关系示意图如图 1 所示。

由于各子眼的视场角 θ 大小相等,则可以得出: $\alpha = \theta - \Delta\phi$ 。当 $\alpha = 0$,即 $\theta = \Delta\phi$ 时,相邻子眼间存在从基底出发的一系列平行空间区域的成像盲区;当 $\alpha = \Delta\phi$,即 $\theta = 2\Delta\phi$ 时,光轴 1 平行于光线 2,光线 3 平行于光轴 4,相邻子眼的视场刚好可以覆盖整个物面;



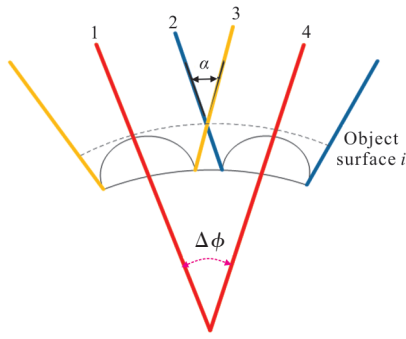
(a) 总分析图

(a) Total analysis



(b) $\alpha = 0$ 时的示意图

(b) Schematic when $\alpha = 0$



(c) $\alpha=\Delta\phi$ 时的示意图

(c) Schematic when $\alpha=\Delta\phi$

图 1 角度分析

Fig.1 Angle analysis

在物面 i 以上, 相邻子眼之间有重叠部分, 即紫色阴影部分, 重叠角度为 α 。为了不使每个子眼视场的边缘图像丢失严重, 也不会重叠过大导致系统失去大视场的优势, 所以在设计时一般使 $\Delta\phi < \theta < 2\Delta\phi$ 。

1.2 原理模型

按照圆周阵列排布后, 相邻微透镜边缘之间的直线距离为 p , 文中将使用此种微透镜阵列结构的仿生复眼光学系统称为间隔型曲面仿生复眼光学系统。以下为针对文中设计的间隔型曲面仿生复眼光学系统提出的成像原理数学模型, 其成像原理如图 2 所示。

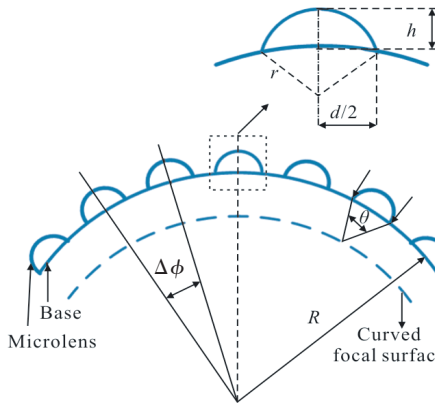


图 2 间隔型曲面仿生复眼成像原理

Fig.2 Schematic of curved bionic compound eye imaging with spaced-type micro-lens

根据图 2 中微透镜阵列的几何关系得:

$$\Delta\phi = \arctan \frac{d+p}{R} \quad (1)$$

式中: p 为相邻微透镜边缘之间的直线距离; R 为基底的曲率半径; $\Delta\phi$ 为相邻小眼之间的夹角; d 为子

眼的口径。

单个微透镜可以看作一个球面镜, 根据光学原理, 单透镜的焦距公式^[12]为:

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) + \frac{(n-1)^2 h}{nrR} \quad (2)$$

根据图 2 中子眼的几何关系得:

$$\left(\frac{d}{2} \right)^2 + (r-h)^2 = r^2 \quad (3)$$

式中: f' 为子眼的焦距; r 为子眼的曲率半径; h 为子眼的中心厚度。

在基底表面径向排布的微透镜数目为 M , 每个微透镜单元的口径 d 和每个单元微透镜对应的光敏单元数 v 。对于具有 N 个像素和像素宽度 s 的光电探测器阵列, 满足以下等式:

$$N = Mv \quad (4)$$

$$s = \frac{d+p}{v} \quad (5)$$

微透镜阵列的视场 2ω 为:

$$2\omega = 2(\alpha\Delta\phi + \theta) \quad (6)$$

式中: 2ω 为整个复眼的视场角; θ 为单个子眼的视场角; α 为在基底表面按照一定角度间隔进行圆周分布的微透镜阵列除去中心子眼剩余的圆周数。

2 光学系统设计

文中设计的曲面仿生复眼光学系统主要由曲面微透镜阵列、转像系统、平面探测器组成。由于微透镜阵列所成的像面为曲面像, 但是目前曲面探测器应用较少, 所以文中提出了微透镜阵列与传统的转像系统相结合的成像方案, 使用转像系统将曲面像转换为能够被平面探测器接收的平面像, 也能有效校正曲面微透镜阵列所引起的场曲。文中所设计的曲面仿生复眼光学系统结构如图 3 所示。

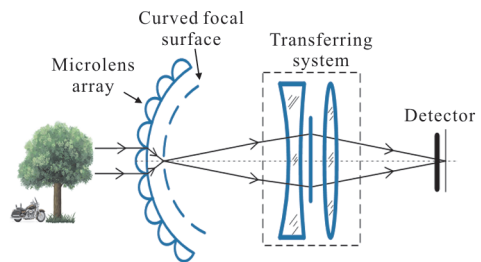


图 3 曲面仿生复眼光学系统结构

Fig.3 Curved bionic compound eye optical system structure

2.1 系统设计参数

为验证所提出数学模型的准确性,使用该模型求解光学系统的参数。

根据设计指标要求:该系统的视场不小于 150° 。设计各子眼边缘之间的距离 $p=0.5\text{ mm}$,根据公式(1)计算得: $d=2\text{ mm}$ 。

子眼焦距 $f_1'=4\text{ mm}$,微透镜的材料采用 PMMA,折射率 $n=1.49$,根据公式(2)~(3)联立求解得: $h\approx 0.255\text{ mm}$, $r\approx 2.09\text{ mm}$ 。

根据所选择的探测器数据,结合公式(4)、(5)计算得径向排布的子眼数目为 9,每个子眼包含的像素数为 270×270 ,子眼总数目为 81。

设计的圆形微透镜阵列结构中 $a=4$,根据子眼光轴之间夹角与子眼视场角的关系,公式(6)得出: $\Delta\phi$ 为 14° , θ 为 20° , $14\times 4+20=76$, $2\omega=152^\circ$ 。

经计算得到文中要设计的系统参数如表 1 所示。

表1 曲面仿生复眼系统参数

Tab.1 Curved bionic compound eye system parameters

Parameters	Value
Radius of base layer R/mm	10
Angle of adjacent sub-eye $\Delta\phi/(\circ)$	14
FOV of b-eye $\theta/(\circ)$	20
Number of sub-eye M	81
Focal length of sub-eye f_1'/mm	6
Aperture of sub-eye d/mm	2
Number of pixels per sub-eye v	270×270
FOV (Field of view) $2\omega/(\circ)$	152
Number of pixels in the detector N	$3\ 280\times 2\ 464$
Size of pixel/ μm	1.12

2.2 子眼透镜设计及优化

使用间隔型曲面仿生复眼参数计算模型得出微透镜阵列中每个子眼的初始结构参数如表 2 所示。

将初始结构参数输入光学设计软件中进行仿真分析,得到的光线追迹图以及点列斑如图 4 所示。

表 2 子眼初始结构参数

Tab.2 Initial sub-eye structure parameters

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
Standard	2.09	0.26	PMMA
Standard	10	-	-

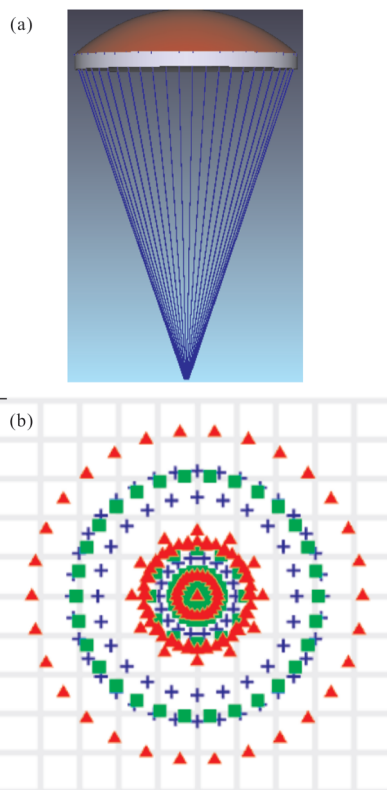


图 4 子眼初始结构光线追迹图及点列图

Fig.4 Sub-eye initial structure ray tracing and spot diagram

通过观察子眼系统初始结构的 Layout、Ray Fan、Spot Diagram 等图形,分析 0° 视场中可能存在的像差。分析 Layout 图发现轴上点发出的同心光束经透镜后不能会聚在同一点;与光轴成不同角度的光线通过透镜后,相对于理想像点均有不同程度的偏离;结合图 4 中的点列图成圆环状分布,其均方根半径为 $4.011\ \mu\text{m}$,得出系统中存在的球差比较严重。使用非球面及球差校正函数对球差进行校正,仿真分析后得到的子眼结构参数如表 3 所示。

表 3 子眼参数

Tab.3 Sub-eye parameters

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
Even asphere	1.667	0.491	PMMA
Standard	10	3.603	-

经过仿真分析,子眼的光线追迹图和点列斑如图 5 所示,球差校正效果明显,得到的均方根半径为 $0.759 \mu\text{m}$,小于单个像元尺寸($1.12 \mu\text{m}$),能够满足光学系统与探测器的匹配要求。

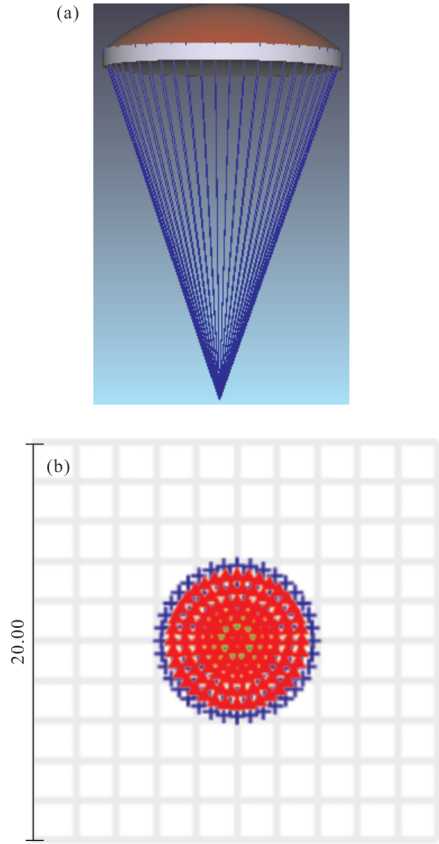


图 5 子眼光线追迹图及点列图

Fig.5 Sub-eye ray tracing map and spot diagram

按照设计的结构将子眼排布在曲率半径 $R=10 \text{ mm}$ 的基底上,在光学设计软件非序列模式中仿真后的模型图如图 6 所示。

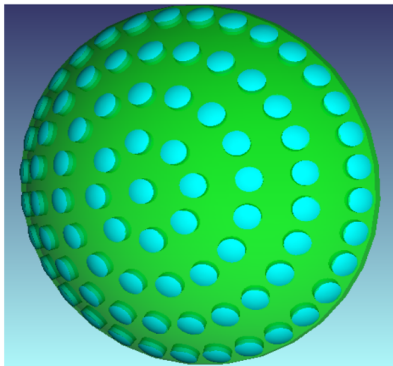


图 6 微透镜阵列

Fig.6 Microlens array

2.3 转像系统设计

每个相同焦距的子眼所成的焦曲面像与基底同心,则焦曲面像的曲率半径等于基底的曲率半径减去子眼的焦距。将该焦曲面作为物面,然后用转像系统将其变换为平面像,再被平面探测器接收,利于像差校正,提高成像系统的像质。

为了保证子眼系统和转像系统相匹配需要满足:转像系统的物面范围应大于等于焦曲面,且两者曲率相同,则子眼系统的像都能进入转像系统。同时,转像系统的口径应该大于边缘子眼光线的口径,从而保证边缘子眼系统的光线都能进入转像系统。沿轴方向子眼到转像系统的距离为 L ,转像系统口径为 D_r ,视场角为 ω_r 。转像系统第一个透镜的角放大率为 γ 。利用几何成像原理可以得到子眼系统和转像系统匹配公式为:

$$\begin{bmatrix} \omega_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & \frac{1}{2R} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} D_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\tan\omega_r \cdot \gamma & 2\tan\omega_r \cdot \gamma \\ R & L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{4R'^2 - D'^2} & \sqrt{4R'^2 - D'^2} \\ \frac{1}{2} & f'_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (R-f'_1)D & (L-f'_1)d \\ \frac{1}{f'_1} & \frac{1}{2R} \end{bmatrix} \quad (8)$$

设计的转像系统的技术参数如表 4 所示。

表 4 转像系统技术参数

Tab.4 Technical parameters of the transferring system

Parameter	Value
Focal length f'_1/mm	1.07
FOV $\omega_r/(\text{°})$	130
Distance between the sub-eye and the transferring system L/mm	5
Aperture D_r/mm	0.356

根据设计经验,由于所需的视场角较大,搭建一个鱼眼镜头作为转像系统的初始结构,初始结构光路图如图 7 所示。

转像系统初始结构的参数如表 5 所示。

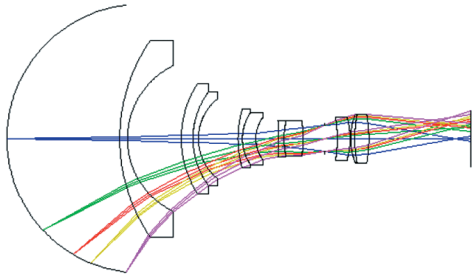


图 7 初始结构光路图

Fig.7 Initial structure light path diagram

表 5 转像系统初始结构参数

Tab.5 Initial structural parameters of the transferring system

Surf:type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
Standard	7.74	0.34	1.59,61.2
Standard	4.52	0.52	1.78,25.7
Standard	3.50	0.24	1.59,61.2
Standard	4.72	0.20	1.66,57.4
Standard	2.06	0.60	1.67,33.1
Standard	-12.2	0.24	1.77,49.6
Standard	3.46	0.84	1.58,40.7
Standard	-5.93	0.57	1.53,70.4
Standard	2.90	0.18	1.92,20.9
Standard	5.69	0.62	1.53,70.4

经分析计算,转像系统初始结构的初级像差值如表 6 所示。

表 6 初始结构初级像差

Tab.6 Initial structure primary aberration

SPHA	COMA	ASTI	FCUR	DIST
0.010 787	0.012 566	0.027 327	-0.004 030	0.336 322

从表 6 中可以看出初始结构存在的初级像差中畸变、彗差、像散均较大,其他初级像差值在 0.01 左右,该系统需要根据所设计系统的参数要求进一步分析计算。

将物面的曲率半径设置为微透镜阵列所成的曲面像的曲率半径。使用光学设计软件对转像系统的初始结构进行仿真分析,经过对初始结构中的透镜参数进行优化,提高边缘视场的成像质量。最终设计得到的转像系统使用 5 组 7 片式结构,系统总长为

12 mm。系统实现焦距为 1.07 mm,视场为 130°。系统的光路图如图 8 所示。

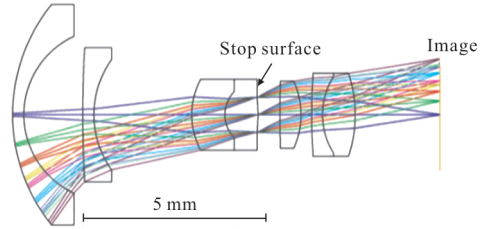


图 8 转像系统光路图

Fig.8 Optical path of the transferring system

经分析计算,转像系统初级像差值如表 7 所示。

表 7 转像系统初级像差

Tab.7 Primary aberration of the transferring system

SPHA	COMA	ASTI	FCUR	DIST
0.002 042	-0.000 347	0.000 012	0.002 785	0.235 302

从表 7 中可以看出,与初始结构相比,优化后的系统初级像差有了明显的减小,满足成像要求。

3 像质评价

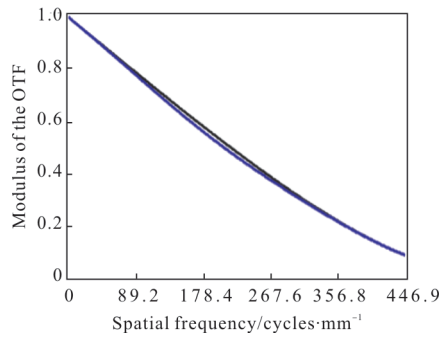
主要依据系统的传递函数、相对照度曲线及点列斑大小来评价该系统的成像质量。

光学系统的奈奎斯特频率计算公式为:

$$N_n = \frac{1}{2s} = \frac{1}{2 \times 1.12 \times 10^{-3}} = 446.4 \text{ lp/mm} \quad (9)$$

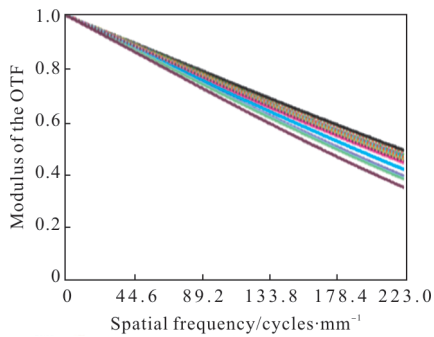
式中: s 为文中所选探测器的单个像元尺寸。该系统按照视场角大小来分类,可归为广角镜头,使用光学传递函数对其成像质量进行评价时,轴上视场取全频率 446.4 lp/mm,轴外视场选择半频率 223 lp/mm 作为光学系统的光学传递函数最大参考空间截止频率值。转像系统在不同视场下的调制传递函数(MTF)曲线如图 9 所示,可以看出轴上视场基本达到衍射极限,在奈奎斯特频率为 223 lp/mm 时,系统 MTF 值接近 0.4,成像质量良好。

图 10 为相对照度曲线图。从图 10 可以看出,转像系统相对照度各个视场均大于 75%,可以正常成像,且像质良好。



(a) 轴上视场 MTF

(a) MTF of on-axis field of view



(b) 轴外视场 MTF

(b) MTF Of off-axis field of view

图 9 转像系统 MTF 曲线

Fig.9 MTF curve of transferring system

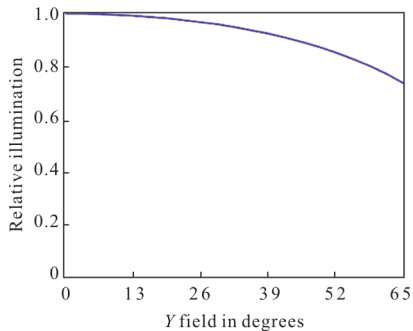


图 10 相对照度曲线图

Fig.10 Relative illumination

图 11 为转像系统的均方根半径,其最大的均方根半径为 $1.11 \mu\text{m}$,小于单个像元大小,像质良好。图 12 为场曲/畸变图,系统的场曲小于 0.02 mm ,边缘视场的畸变为 17% 。

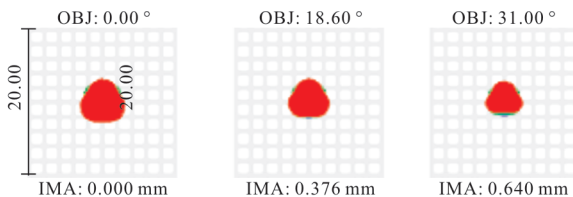


图 11 转像系统点列图

Fig.11 Spot diagram of transferring system

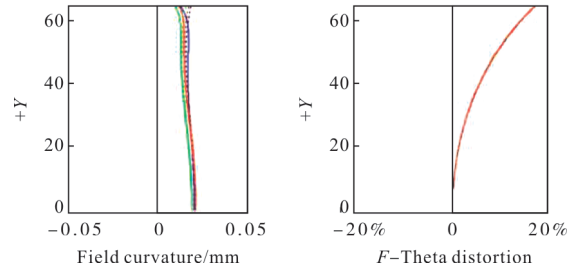


图 12 场曲/畸变

Fig.12 Field curvature/ F -Theta distortion

4 公差分析

光学系统的最终性能会由于透镜加工装调、材料等产生的误差而受到影响,将公差引入光学系统中进行分析能够得出最终的系统性能是否符合要求。公差分析主要有三种评价标准:RMS spot radius、RMS wavefront、Diff.MTF,文中采用 Diff.MTF 均值作为评价标准对系统进行公差分析,按照目前的加工水平,结合设计经验分配公差如表 8 所示。

表 8 第一次公差分配

Tab.8 First tolerance allocation

Parameters	Specification
Radius/Fringes	5
Thickness/mm	0.05
Surface decenter/mm	± 0.05
Surface tilt/(°)	± 0.05
Element decenter/mm	± 0.05
Element tilt/(°)	± 0.2
Index	0.001
Abbe	0.5%

按照表 8 中的公差分配方案使用蒙特卡洛分析方法对系统进行分析, 并对 MTF 进行叠加显示, 结果如图 13 所示。

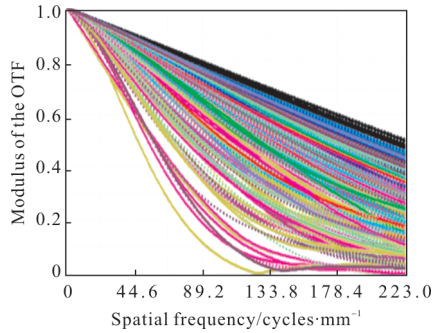


图 13 第一次公差分析后的 MTF

Fig.13 MTF after the first tolerance analysis

可看出 MTF 在 200 lp/mm 处 90% 大于 0.1, 与图 9 中理想状态的 MTF 相比下降了 0.3, 成像质量下降严重。参考分析结果, 对影响严重的表面及元件的倾斜偏心重新进行公差分配, 分配结果如表 9 所示。

表 9 第二次公差分配

Tab.9 Second tolerance allocation

Parameters	Specification	Surface
Surface decenter/mm	±0.02	5-6
Surface tilt/(°)	±0.02	4-7
Element decenter/mm	±0.02	1-9
Element tilt/(°)	±0.02	1-9

根据表 9 再次进行蒙特卡罗分析, 得到的 MTF 如图 14 所示。

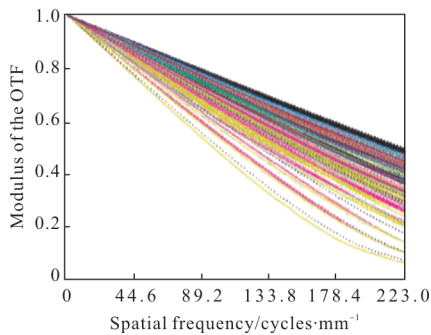


图 14 第二次公差分析后的 MTF

Fig.14 MTF after the second tolerance analysis

结果显示, MTF 在奈奎斯特频率为 223 lp/mm

处, 全视场 85% 大于 0.2, 轴上 50% 大于 0.44, 满足成像要求。

根据组合焦距公式:

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - L} \quad (10)$$

系统的总焦距为: $f' = 61.14 \text{ mm}$ 。

根据衍射理论, 无限远物体被理想光学系统形成的衍射图案中, 第一暗环半径对出射光瞳中心的张角为:

$$\Delta\theta = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (11)$$

式中: $\Delta\theta$ 为光学系统的最小分辨角; D 为出瞳直径。在此系统中, 最小分辨角受到小孔径的微透镜限制, 所以取微透镜的口径, 则系统的衍射极限对应的最小分辨角为 $\Delta\theta = 0.00064^\circ = 2.304''$ 。

根据 Johnson 准则, 在 50% 的概率下, 发现目标至少需要 1 个线对, 识别目标至少需要 4 个线对, 辨认目标至少需要 8 个线对^[13]。计算公式如下:

$$\frac{R'}{H} = \frac{f'}{N \cdot s} \quad (12)$$

式中: R' 为探测距离; H 为目标大小; f' 为系统焦距; N 为识别目标所需像元数; s 为单个像元尺寸。改系统 $f_1' = 4 \text{ mm}$, $s = 1.12 \mu\text{m}$, 取 $N = 16$, 经计算, 该系统可辨认 1.1 km 外 5 m 大小的目标。与传统成像系统相比, 在同等体积下, 该系统在增大视场的基础上提高了分辨率, 且扩展了仿生复眼系统的探测范围。

5 结论

文中建立了间隔型曲面仿生复眼光学系统参数的成像原理数学模型, 并用其计算得出系统参数, 从而设计了曲面仿生复眼成像系统。在该系统中使用像面变换的成像方案, 解决了曲面像无法被平面探测器接收的问题, 同时校正了曲面微透镜阵列带来的部分场曲。设计结果显示, 子眼透镜及转像系统的均方根半径均小于单个像元尺寸, 转像系统轴上视场的光学传递函数接近衍射极限, 轴外视场的光学传递函数值在奈奎斯特频率为 223 lp/mm 时接近 0.4; 经过公差分析, 结果显示 MTF 在 223 lp/mm

处,全视场 85% 大于 0.2,轴上视场 50% 大于 0.44,相对照度等指标也满足成像要求;系统结构紧凑,且提升了视场以及分辨率,实现了大视场、高分辨成像。后续将对该系统进行加工制造,继续研究探索仿生复眼光学系统更多的功能。

参考文献:

- [1] Cao A, Wang J, Hui P, et al. Design and fabrication of a multifocal bionic compound eye for imaging [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018, 13(2): 1748.
- [2] He Jianzheng. Research on calibration and position of a spherical artificial compound eye [D]. Hefei:University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [3] Li Lun, Hao Yongping, Diao Xiaolei, et al. Aspherical compound eye optimization and positioning technology with variable focal length [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 216–226. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] Chen W, Zhang X, Liu X, et al. Optical design and simulation of a compact multi-aperture camera based on a freeform microlens array [J]. *Optics Communications*, 2015, 338(3): 300–306.
- [6] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. High performance imaging using large camera arrays [J]. *Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 765–776.
- [7] Camara R P, Vila G B, Lecoeur J, et al. Miniature artificial compound eyes for optic-flow-based robotic navigation [C]//Workshop on Information Optics. IEEE, 2014: 6933290.
- [8] Floreano D, Pericetcamara R, Stéphane Viollet, et al. Miniature curved artificial compound eyes[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2013, 110(23): 9267–9272.
- [9] Fu Yuegang, Zhao Yu, Liu Zhiying, et al. Design of compact bionic compound eye optical system used for target identification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0602001. (in Chinese)
- [10] Shi Chengyong. Research on the design and image process of bioinspired spherical compound eye imaging system [D]. Changchun:University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017. (in Chinese)
- [11] Hao Yongping, Zhao Longfei, Zhang Jiayi. Optimal research of aspherical zoom curved compound eye [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 157–162. (in Chinese)
- [12] Zhang Yimo. Applied Optics [M]. 3rd ed: Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 53–57. (in Chinese)
- [13] You Ruirong, Wang Xinwei, Ren Pengdao, et al. Target observation performance evaluation method for video surveillance based on Johnson criteria [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1217003. (in Chinese)