

目标定位仿生复眼视觉系统成像位置计算

王小蕾,王克逸,曹兆楼,闫培正,郭方

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230027)

摘要: 用于目标定位的仿生复眼视觉系统,目标成像位置的精确计算是提高系统定位精度的关键。文章从像斑能量分布的角度出发,介绍了一种较为适于复眼成像位置计算的方法:能量对称法。该方法以主光线在像斑上的坐标定义像斑重心,以主光线像点是像斑能量对称中心的原理来获得像斑重心(即像斑位置)。文中以仿生复眼视觉系统的简化模型为研究对象,应用能量对称法对理论模拟像斑和实验像斑进行了实际计算,计算表明理论像斑位置可以通过能量对称法准确得到;利用实验像斑位置计算入射光线角度也达到了较为理想的计算精度。文中采用传统的灰度重心法同步计算,与新方法形成对比。

关键词: 目标定位; 复眼; 像斑重心; 能量; 灰度重心法

中图分类号: TP391.4;TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3433-07

Location of the target image for compound eye system

Wang Xiaolei, Wang Keyi, Cao Zhaolou, Yan Peizheng, Guo Fang

(Department of Precision Machinery & Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Accurate calculation of the spotlight center position on the image is important to improve target localization accuracy for compound eye system. A method of calculating the spotlight position was introduced based on the symmetric property of the energy field. The position of main light on the image was defined as the position of the light spot on the image, and can be get by calculating the point of the spot energy centre on the image. Simulation and real images were used both with gray gravity method and energy method respectively, and the results show that energy method agrees with ideal position. Incident angle was calculated from the position of the image spot, the result shows energy method is also better than gray gravity method.

Key word: target position; compound eye; spotlight center position; energy; gray gravity

收稿日期:2013-04-05; 修订日期:2013-05-03

基金项目:国家自然科学基金(61275011);国家自然科学基金(51005222)

作者简介:王小蕾(1976-),女,硕士生,主要从事信号检测方面的研究。Email:wxl-20062006@163.com

导师简介:王克逸(1962-),男,教授,博士生导师,博士后,主要从事近场光学和微光学的教学和科研方面的研究。

Email:kywang@ustc.edu.cn

0 引言

文中提到的仿生复眼视觉系统模型是一个典型的曲面型仿生复眼结构，设计应用于运动目标的位置探测。运动目标的空间位置通过其在仿生复眼视觉系统中多像的信息融合进行求解。该模型的高精度物像关系已经通过基于 LM 算法的神经网络^[1]实现。为了进一步提高目标位置探测精度，在仿生复眼视觉系统的 CCD 接收面(或 CMOS 阵面)上精确解算目标成像位置成为研究推进的关键。目标成像位置用成像光束主光线的位置定义，文中称为像斑重心。

目前，成像像斑的位置计算方法主要有灰度重心法^[2]、高斯拟合法^[3]、几何中心法^[4]等。重心法是普遍采用的一种光斑重心计算方法，其算法简单，在信噪比高和图像灰度对称的情况下，可以获得很高的计算精度。高斯拟合法适用于光强呈高斯分布场合，对像斑灰度是否对称不敏感；几何中心法通过对目标的边界进行椭圆拟合，以拟合图形的中心代替像斑的重心。文中讨论的仿生复眼因其结构的特殊性，成像光斑不具有普遍的灰度对称性，像斑重心不一定在其几何中心上，因此上述像斑重心计算方法的适用性均受到影响。文中提出的以能量^[5]为计算对象，以像斑能量和对称原理的重心算法，经过理论光斑和实际光斑的计算检验，达到了较为理想的计算精度，优于传统的灰度重心计算方法。

1 仿生复眼视觉系统的基本结构

图 1 是实验室仿生复眼视觉系统的曲面复眼结构^[6]。仿生复眼主框架为一个球冠，球冠面上密布多个子眼透镜，复眼的整体视场角为 110°，相邻子眼通道在视场上存在重叠，子午面上相邻通道夹角为 7°。

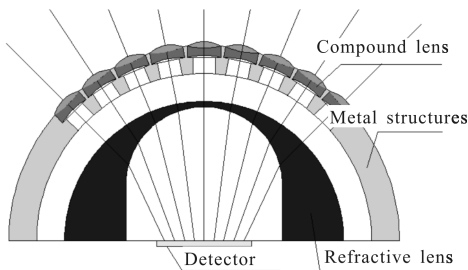


图 1 仿生复眼结构

Fig.1 Structure of compound eye

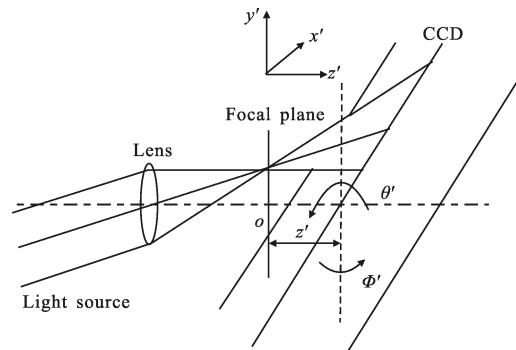
通过在子眼透镜和 CCD 成像面间增加折转透镜，改善了仿生复眼边缘透镜成像质量。

2 仿生复眼结构成像分析

与生物子眼具有独立的感光细胞不同，仿生复眼视觉系统各个子眼共用一个位置固定的平面 CCD (或是 CMOS) 图像传感器作为其成像接收面。任取图 1 中一个子眼，用无穷远物点讨论成像问题，讨论模型的光路中暂不考虑折转透镜的作用。如图 2(a)所示，复眼中任意子眼的成像可以归结为一个透镜位置一定、CCD 相对位置变化的成像问题。图 2(a)称为偏歪成像模型。模型中 CCD 阵面上的像斑可表示为：

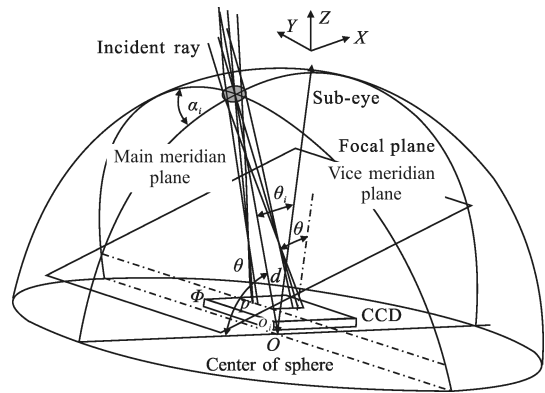
$$I_{img}(\xi, \eta) = f(z', \phi', \theta') \tag{1}$$

如图 2(b)所示，以子眼中心轴和 CCD 平面中心法向量共面定义主子午面，子眼中心轴和入射光束



(a) 仿生复眼偏歪成像模型

(a) Skew image model of compound eye



(b) 不同入射光束在仿生复眼模型的成像

(b) Different image through compound eye with different incident beam

图 2 仿生复眼偏歪成像模型

Fig.2 Simplified imaging model

主光线定义副子午面,光线分别从主、副子午面入射;若以子眼中心轴与 CCD 平面交点为坐标原点 O_i ,子眼中心轴指向球心反向为右手直角坐标系的 OZ_i 轴正向,轴 O_iX_i 在子眼主子午面内指向轴 OZ 为正,轴 O_iY_i 和轴 O_iZ_i 、 O_iX_i 构成右手直角坐标系,则每个子眼的 CCD 图像坐标和整个复眼的 CCD 图像坐标有如下变换关系:

$$P_{img}(X_i, Y_i) = T_{d_i} M_{\theta_i} M_{\alpha_i} P_{img}(X, Y) \quad (2)$$

式中: d_i 为子眼中心轴和 CCD 平面交点到坐标轴 OZ 的距离。 α_i 角为副子午面和主子午面夹角, θ_i 为子眼在坐标系 $OXYZ$ 中的仰角。对 $P_{img}(X_i, Y_i)$ 进行进一步的坐标变换可以得到仿生复眼偏歪成像模型坐标系下的 CCD 像素位置。

3 用焦点附近三维光场的理论仿真复眼像斑

根据 2 建立的复眼偏歪成像模型,用焦点附近光场特性^[7]来仿真复眼成像的像斑。仿真像斑用于验证比对重心算法结果。

如图 3 所示,入射光经子眼聚焦后焦平面上的光强分布本质上可以认为是由透镜孔上的夫琅禾费衍射产生的。考虑一个单色球面波,它通过一个透镜后,会聚于轴上焦点 O 。透镜的直径是 $2a$,设焦点附近点 P 处的扰动为 $U(p)$,点 P 至波阵面上某点 Q 的距离为 s ,入射波在 Q 点的振幅为 A/f ,点 $P(x, y, z)$ 相对于焦点 O 的位置矢量为 \mathbf{R} ,按照惠更斯-菲涅尔原理,并忽略倾斜因子的影响,有:

$$u(p) = \frac{-i}{\lambda} \frac{Ae^{-ikf}}{f} \iint_w \frac{e^{iks}}{s} d\sigma \quad (3)$$

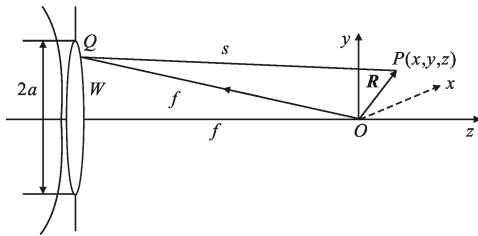


图 3 会聚球面波在圆孔上的衍射

Fig.3 Diffraction of converging spherical wave through a circular hole

通过引入两个无量纲量 u, v 表达观察点 P ,可以得到焦点附近光场分布的光强 $I=|u(p)|^2$ 的两个表达式:

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f}\right)^2 z \quad v = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f}\right) r \quad (4)$$

当 $|u/v| < 1$ 时,

$$I(u, v) = \left(\frac{2}{u}\right)^2 [U_1^2(u, v) + U_2^2(u, v)] I_0 \quad (5)$$

当 $|u/v| > 1$ 时,

$$I(u, v) = \left(\frac{2}{u}\right)^2 \{1 + V_0^2(u, v) + V_1^2(u, v) - 2V_0(u, v) \cdot \cos\left[\frac{1}{2}\left(u + \frac{v^2}{u}\right)\right] - 2V_1(u, v) \cdot \sin\left[\frac{1}{2}\left(u + \frac{v^2}{u}\right)\right]\} I_0 \quad (6)$$

式中:

$$I_0 = \left(\frac{\pi a^2 A}{\lambda f^2}\right)^2 \quad (7)$$

I_0 是几何焦点 $u=v=0$ 处的强度。 U_1, U_2, V_0, V_1 均为洛梅尔函数。

取子眼直径 $\Phi 6 \text{ mm}$ 及透镜焦距 $f=38.1 \text{ mm}$, 波长 $\lambda=650 \text{ nm}$ 代入公式 (4)~(7) 仿真偏歪成像模型 CCD 在离焦量为 $4000 \mu\text{m}$ 、偏转角 $\varphi'=5^\circ$ 和多个 θ' 条件下的像斑灰度图。仿真图像大小为 201×201 个像素,像元大小为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$,图 4 显示光斑椭圆形明显。

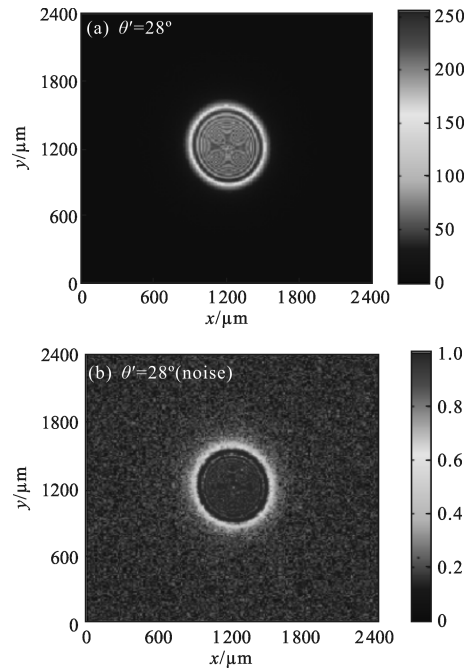


图 4 理论像斑灰度图 ($z'=4000 \mu\text{m}, \varphi'=5^\circ$)

Fig.4 Simulation spotlight grayscale distribution ($z'=4000 \mu\text{m}, \varphi'=5^\circ$)

4 像斑位置计算方法

4.1 灰度重心法

设光斑的图像大小为 $m \times n$ 个像素,其灰度表示

为 $F(i, j)$, 其中 $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$, 将其进行阈值处理后得:

$$f(i, j) = \begin{cases} F(i, j), & F(i, j) > T \\ 0, & F(i, j) < T \end{cases} \quad (8)$$

T 表示背景阈值。灰度重心法实际上就是计算阈值化后光斑图像的一阶矩, 其坐标可以表示为:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} if(i, j)}{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} f(i, j)}, \quad \hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} jf(i, j)}{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} f(i, j)} \quad (9)$$

式中: (\hat{x}, \hat{y}) 为目标像斑重心坐标估计值, $f(i, j)$ 代入 (i, j) 处像元的灰度值。用灰度重心法计算图 4 像斑重心, 计算结果见表 1 和表 2。

表 1 仿真像斑重心算法结果比较
($z'=4\ 000\ \mu\text{m}$, 无噪声)

Tab.1 Results comparison of the calculated image center by two methods($z'=4\ 000\ \mu\text{m}$, no noise)

Algorithm	(φ', θ')	Spotlight center position/pixel
Energy method	$(5^\circ, 0^\circ)$	(101.00, 101.00)
	$(5^\circ, 7^\circ)$	(101.00, 101.00)
	$(5^\circ, 14^\circ)$	(101.00, 101.00)
	$(5^\circ, 21^\circ)$	(101.00, 101.00)
	$(5^\circ, 28^\circ)$	(101.00, 101.00)
Gravity method	$(5^\circ, 0^\circ)$	(101.00, 100.90)
	$(5^\circ, 7^\circ)$	(101.30, 100.78)
	$(5^\circ, 14^\circ)$	(101.59, 100.79)
	$(5^\circ, 21^\circ)$	(101.93, 100.79)
	$(5^\circ, 28^\circ)$	(102.36, 100.78)

表 2 仿真像斑重心算法结果比较($z'=4\ 000\ \mu\text{m}$, 高斯噪声($\mu=38.25, \sigma^2=121$))

Tab.2 Results comparison of the calculated image center by two methods($z'=4\ 000\ \mu\text{m}$, Gaussian noise($\mu=38.25, \sigma^2=121$))

Algorithm	(φ', θ')	Spotlight center position/pixel
Energy method	$(5^\circ, 0^\circ)$	(101.00, 101.00)
	$(5^\circ, 7^\circ)$	(101.00, 101.00)
	$(5^\circ, 14^\circ)$	(101.00, 101.00)
	$(5^\circ, 21^\circ)$	(101.00, 101.00)
	$(5^\circ, 28^\circ)$	(101.00, 101.00)
Gravity method	$(5^\circ, 0^\circ)$	(101.00, 100.89)
	$(5^\circ, 7^\circ)$	(101.14, 100.90)
	$(5^\circ, 14^\circ)$	(101.28, 100.89)
	$(5^\circ, 21^\circ)$	(101.44, 100.90)
	$(5^\circ, 28^\circ)$	(101.69, 100.89)

实际像斑在图像的获取和传输过程中会产生大量的噪声, 重心算法在噪声干扰下是否适宜也需要加以考虑。在图 5(a)所示的实际像斑图像中截取 50×50 像素的图像带, 对像斑噪声进行估计。如图 5(b)所示, 图像噪声为均值 $\mu=61$, 方差 $\sigma^2=121$ 的高斯噪声(椒盐噪声在此暂时不作考虑)。在图 4(a)的理论像斑图像中加入均值为 $\mu=38.25$, 方差为 $\sigma^2=121$ 的高斯噪声模拟实际测量像斑, 如图 4(b), 计算像斑重心位置, 结果见表 2。灰度重心法计算的光斑重心依然偏离理论值, 但较无噪声干扰情形更接近理论值, 说明灰度重心法的抗噪声干扰性是比较好的。注意到灰度重心法在 $\varphi'=5^\circ, \theta'=0^\circ$ 的两种情形下行方向坐标都是准确的, 这与 CCD 模拟接收面在行方向图像对称是一致的, 符合灰度重心法适用于对称图像重心计算的规律。

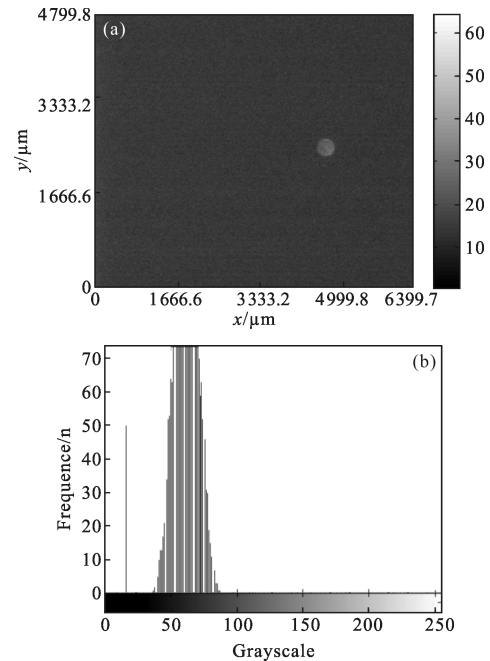


图 5 实际像斑和其噪声直方图

Fig.5 Real image and noise histogram

4.2 能量对称法计算光斑重心

根据照明区强度公式(7)及洛梅耳函数的性质:

$$U_1(-u, v) = -U_1(u, v), \quad U_2(-u, v) = U_2(u, v), \\ V_0(-u, v) = V_0(u, v), \quad V_1(-u, v) = -V_1(u, v) \quad (10)$$

可知, 焦点附近, 光场强度分布对几何焦面是对称的, 对 u 轴(即主光轴)也是圆对称的。能量对称重心算法的原理正是利用上述光场分布的对称性来计算像斑重心的。在图 2(b)所示的聚焦光束中, 过主光

线的任一平面,均分聚焦光束,又因为光束截面^[8]的能量守恒,CCD 探测阵面上获得的像斑能量也关于过重心点的直线对称。沿 CCD 探测面寻找行、列方向能量对称像素线,两线的交叉点,即为主光线成像位置,即像斑重心。用能量对称法计算图 4 系列的光斑重心,其结果和光斑理论中心(101,101)完全吻合,见表 1 及表 2;在均值为 $\mu=38.25$,方差为 $\sigma^2=121$ 的高斯噪声影响下,能量对称法计算光斑重心位置依然和理论重心完全吻合,高斯噪声对能量对称重心算法的影响几乎可以忽略;计算结果也表明,能量对称算法对图像灰度是否对称没有敏感特性。实际像斑重心的计算,因为 CCD 噪声及环境噪声等的影响,像斑信噪比高低不同,像斑图像一般要经过信号增强、滤波等预处理,为了使像斑重心计算达到亚像素计算精度,还会对像斑光强分布进行亚像素间隔的样条曲面插值等处理。

5 仿生复眼视觉系统简化模型的实际像斑重心计算

图 6 所示是依据图 2(b)所示的仿生复眼视觉系统简化模型搭建的实验平台光路示意图。成像系统由激光光源、扩束器、光圈、滤光镜组合、簇眼、CCD 图像采集系统和五自由度旋转平移机构组成。实验以计算入射光线的角度精度来间接评判像斑重心算

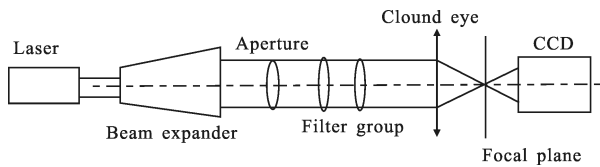


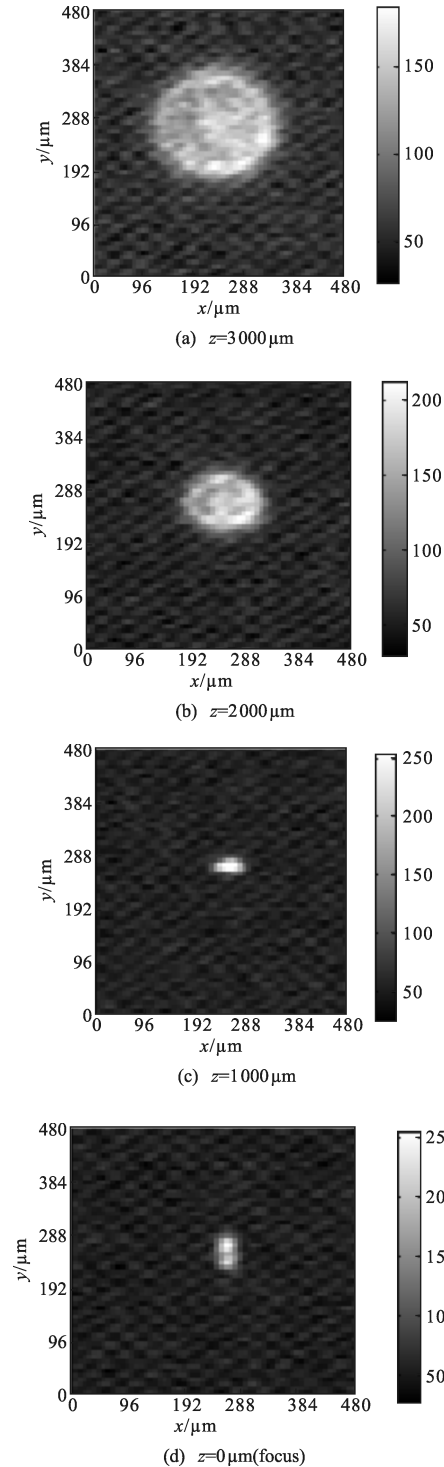
图 6 仿生复眼的简化模型光路

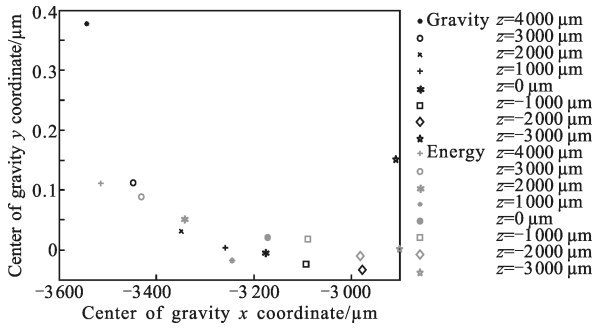
Fig.6 Ray path diagram of simplified compound eye

法的优劣。实验过程为:波长为 650nm 的激光经平行光管准直后,以某一角度方向入射簇眼(一种小型的复眼)的中心通道,光线经子眼透镜在敏通 1802CB 黑白型 CCD 上成像,如图 2(b)所示,CCD 在偏歪成像系统 oz' 轴上垂直平移($\theta'=\varphi'=0$)获得多个离焦位置的像斑,计算像斑重心并进行直线拟合,求取直线的斜率,即可获得图中入射光线角度。实验所用敏通 1802CB 型 CCD,靶面实际尺寸 6.4mm \times 4.8mm,CCD 图像具有 576 \times 768 个像素点,像元尺寸为 8.333 μ m \times 8.333 μ m。图像采集卡为大恒 DH-VT142 型图像采集卡。实验

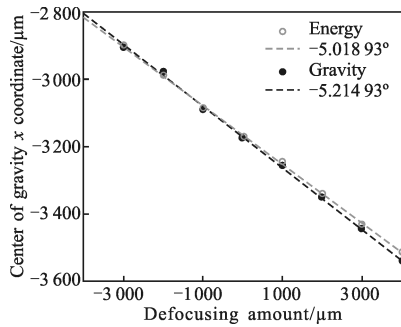
中滤光镜组衰减入射激光强度,保证像斑图像不出现灰度饱和。成像系统以簇眼中心通道的子眼透镜焦点为原点,建立右手坐标系。角度旋转以逆时针方向为正。

图 7(a)~(d)所示为图 2(b)中 $y'oz'$ 平面内 -5° 入射光线条件下实验获得的部分离焦位置像斑图像。应用灰度重心法和能量对称算法计算图 7 系列像斑





(e) 像斑重心 xy 平面位置
(e) Image position in xy plane



(f) 两种重心算法计算入射光线角度
(f) Calculation of incident angle with different method

图 7 -5°入射光像斑及其重心位置图

Fig.7 Image series and their xy value of center(incident angle=-5°)

重心及入射平行光角度。图7(e)显示不同离焦量的像斑重心在 y 方向坐标变化只有±0.4 μm 左右,与重心 x 坐标相比是小量,符合像斑重心在 y 方向上应无变化的规律。根据离焦量与像斑重心 x 坐标计算入射光线角度,图 7(f)显示灰度重心法角度计算值为-5.214 9°,能量对称法角度计算值为-5.018 9°。表3

表 3 两种重心算法计算入射光线角度精度比较

Tab.3 Result comparison of incident angle accuracy with two methods

Incident angle		Gravity method	Energy method
-7°	Angle values	-8.791 1°	-6.983 9°
	Relative error	0.255 8	0.002 3
-5°	Angle values	-5.214 9°	-5.018 9°
	Relative error	0.042 9	0.003 8
-3°	Angle values	-3.519 4°	-2.986 9°
	Relative error	0.173 2	0.004 3
0°	Angle values	-0.498 1°	-0.194 8°
	Relative error	0.498 1°	0.194 8°

给出了应用两种重心算法计算多个角度入射光线的结果。数据显示,运用能量对称法计算像斑重心获得的角度精度较灰度重心法计算像斑重心获得的角度精度提高了一个数量级。

像斑的精确位置分两步计算完成:对像斑进行维纳滤波和顶帽变换预处理,消除全尺寸 CCD 图像区域内的干扰噪声,对 CCD 像斑图像运用能量对称法计算像斑重心初始位置。以像斑的初始位置为中心,在全尺寸 CCD 图像上截取大小为 61×61 个像素的子图像(含像斑)。对子图像进行高斯低通滤波和 1/4 亚像素间隔的样条曲面插值,再次使用能量对称法计算插值图像重心位置;用子图像的重心位置对初始重心位置进行修正,获得最终的像斑重心位置。亚像素间隔的样条曲面插值数据处理步骤,弥补了能量重心法对原始图像计算精度只能精确到像素级的缺点;减小插值点间隔,能量对称法可以获得更高的重心计算精度。

6 结 论

文中从提高仿生复眼视觉系统目标定位精度实际需求出发,研究精确计算目标成像位置的重心算法。文中以无穷远物点的成像位置计算为考察点,首先应用焦点附近三维光场分布理论仿真了简化复眼模型成像像斑,继而通过搭建简化复眼模型成像实验平台,获取了实际的成像像斑。通过对理论和实际像斑重心的计算,对比了两种重心算法的优劣。结果证明在相干光条件下,能量对称法对理论像斑和实际像斑重心的计算准确度都优于灰度重心法。能量对称法计算无穷远点目标位置精度全部达到 0.5% 以下,优于灰度重心法计算精度一个量级,也优于参考文献[9]中 2% 的距离定位精度。

参考文献:

[1] Wang Keyi,Zhang Hao, Cao Zaolou, et al. Calibration and detection of compound eye model [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(8): 1807-1813. (in Chinese)
王克逸,张浩,曹兆楼,等. 仿生复眼视觉系统的标定与探测[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1807-1813.

[2] Gu Yonggang, Zhai Chao, Jin Ye, et al. Precision study and application of light centroid method in measurement of optical fibers position[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009,

- 36(12): 62–67. (in Chinese)
顾永刚, 翟超, 金熠, 等. 光重心法在光纤位置检测中的精度研究与应用[J]. 光电工程 2009, 36(12): 62–67.
- [3] Li Weimin, Yu Qiaoyun, Hu Hongzhuan, et al. Iteration algorithm of surface fitting in the detection of light-spot position [J]. *Optical Technique*, 2004, 30 (1): 33–35. (in Chinese)
李为民, 俞巧云, 胡红专, 等. 光点定位中的曲面拟合迭代算法[J]. 光学技术, 2004, 30(1): 33–35.
- [4] Chen Qingshan, Lv Naiguang, Yan Bixi, et al. Analysis to the methods for Calculating the center position of gaussian-distributed beam spot adopted in a laser alignment system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2004, 12 (5): 486–488. (in Chinese)
陈青山, 吕乃光, 燕必希, 等. 激光准直高斯光斑中心位置计算方法分析[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(5): 486–488.
- [5] Tang Guanqun. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center [J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2009, 24(1): 61–64. (in Chinese)
唐冠群. 几种激光光斑重心定位算法的比较[J]. 北京机械工业学院学报, 2009, 24(1): 61–64.
- [6] Cao Zhaolou, Zhan Zhenxian, Wang Keyi. Structural design of spherical compound eye lens for moving Object detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 70–73. (in Chinese)
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.
- [7] Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 401–408. (in Chinese)
马科斯·波恩, 埃米尔·沃尔夫. 光学原理 [M]. 第七版. 北京: 电子工业出版社, 2005: 401–408.
- [8] Cao Qing, Guo Hong, Deng Ximin, et al. Energy conservation of beam cross-section and energy diffraction divergence [J]. *Acta Optic Sinica*, 1996, 16(4): 389–393. (in Chinese)
曹清, 郭弘, 邓锡铭, 等. 光束截面的能量守恒及能量衍射发散度[J]. 光学学报, 1996, 16(4): 389–393.
- [9] Guo Fang, Wang Keyi, Yan Peizheng, 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. (in Chinese)
郭方, 王克逸, 闫培正, 等. 用于大视场目标定位的复眼系统标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 913–920.