

文章编号 1004-924X(2010)08-1807-07

复眼位标器的标定与探测

王克逸, 张 浩, 曹兆楼, 郭 方, 吴青林, 闫佩正

(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:介绍了一种新型大视场、高灵敏度的复眼位标器,用于探测低空飞行目标并快速获取目标物体的运动参数。叙述了复眼模型的结构和制作方法,并利用 Zemax 对子眼成像通道光线追迹考察其成像特性。介绍了复眼标定与探测方法。采用基于 LM 算法的神经网络训练,建立各个通道精确的物像对应关系。为了检验神经网络标定算法的效果,采用传统的基于二次多项式拟合的算法进行校正对比。仿真结果表明,神经网络算法可以提供更好的精度,从像点可以准确地预测主光线的方向角($10^{-3} \sim 10^{-4}$ rad),而且具有易于集成,方便快捷的特点。此外,进行了目标定位检测的仿真实验,计算了若干目标点的坐标,结果表明各个坐标相对误差均在 3% 以内,对于牺牲空间横向分辨率来提升视场角的复眼光学系统,该结果符合目标探测的要求。

关键词:复眼;神经网络;位置探测;

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1807

Calibration and detection of compound eye model

WANG Ke-yi, ZHANG Hao, CAO Zhao-lou, GUO Fang, WU Qing-lin, YAN Pei-zheng

(*Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 23002, China*)

Abstract: A new compound eye model with wider fields of view and higher agility was introduced to track the low-flying targets in a complex background. The struction and preparation of the compound eye model were described and its imaging channels were traced by Zamax to evaluated imaging characteristics. The calibration and detection of the compound eye were introduced, then LM neural network calibration algorithm was trained to build the relationship between object points and corresponding image points. This calibration algorithm provides an accurate direction angle prediction from their corresponding image points, and it is easy to integrate into the system. Preliminary experimental results for neural network calibration were presented and evaluated, which shows that the residual errors between actual and measured direction angles are around $10^{-3} \sim 10^{-4}$ rad. In detection simulation experiments, several points were calculated and results show that the errors between actual and calculated coordinates of position are within 3%. This is a good result for the compound eye sensor that sacrifices the spatial resolution to improve the angle resolution.

Key words: compound eye; neural network; position detection

收稿日期:2009-11-19;修订日期:2010-01-18.

基金项目:航空科学基金资助项目(No. 20080178002)

1 引言

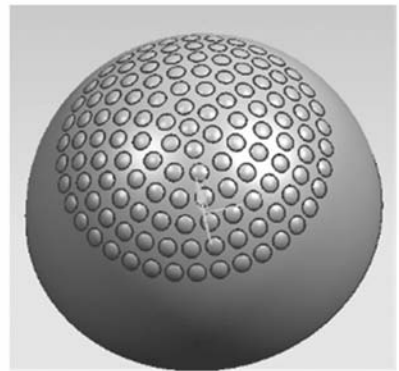
复眼由于其视场大和灵敏度高特性日益受到学术界的关注和重视^[1-3]。目前,国内外对人工复眼的应用展开了多项研究。复眼在商业上著名的应用为日本 Tanita 课题组开发的 TOMBO 复眼^[4],它可以对目标物体三维成像,具有小型化、分辨率高等优点。文献^[5-7]开发了基于复眼结构的机器人越障视觉系统并应用于军事领域。Stanford 大学的 Lenovy 利用平面阵列复眼对同一区域成像,实现了空间物体的深度采集和三维重构^[8-9],他们开发的光场相机与 Adelson 和 Wang 的全光相机^[10]是类似的。加拿大 York University 提出了基于复眼结构的位标探测器原型—“龙眼”,该结构采用光纤束来传递表面上各个通道的图像,虽然将各通道的图像传导在二维平面上,但尚存在安装困难,成本高等缺点^[11-12]。国内中科院长春光机所对多种人工复眼结构进行了研究^[13-15],建立与分析了重叠型复眼光学模型,并引入了曲面场镜阵列,使系统的边缘成像质量进一步提高。清华大学结合昆虫复眼运动神经具有的空间侧抑制机制^[16],开发出具有很宽速度测量范围的复眼系统,实现了捕捉快速移动物体的功能,具有很高的灵敏度。

本文简要介绍了一种新型的复眼模型及相应的制作方法。为了评价复眼模型的探测效果,首先利用 Zemax 光线追迹观察单通道成像,然后采用基于 Levenberg-Marquardt (LM) 算法的神经网络^[17-18]对复眼模型进行标定,建立各通道精确的物像对应关系。最后在探测仿真中融合多通道的信息,运用最小二乘法计算不同位置的点并与真实值做比较。本文客观地评价了该模型的成像效果和探测精度,为复眼的制作、信号处理等奠定了基础。结合实验室研发的电场作用下变焦非球面液滴微透镜制作系统^[19],在未来复眼的探测应用上将有更广阔的提升空间。

2 复眼结构介绍

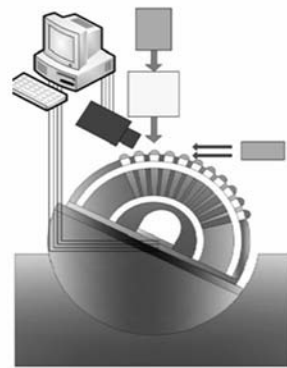
复眼位标器(图 1(a))的主框架为一个球冠,

球冠面上密布了子眼透镜,复眼的整体视场角为 90° ,相邻子眼通道在视场上存在重叠。在优化了子眼通道的数目和重叠系数之后,一定范围内的单目标物体可以同时被多个子眼通道所捕捉,利用多目视觉来提高位置探测的精度。此外,模型采用了折转透镜来保证同一物体在相邻通道的像互不重叠。实验室已经开发了电场作用下的变焦非球面液滴微透镜制作系统,在此基础上将系统经过适当改造可以用于制作复眼位标器(图 1(b))。在该系统上制作复眼位标器可以实时监控每个通道的成像效果,提高分辨率,从而在硬件上提升复眼的探测精度。



(a) 复眼模型

(a) Compound eye model



(b) 复眼制作系统

(b) Fabrication system

Fig. 1 Compound eye and its fabrication system

图 1 复眼及制作系统

3 复眼单通道成像特性

为了考察复眼的单通道成像特性,利用 Zemax

ax 对每个子眼通道光线追迹(图 2)。首先在复眼的子午面内以一定角度为间隔向单通道实施平行光束追迹,获得该通道的成像光斑的几何直径与光束入射角的对应关系(如图 3)。当光线沿光轴方向入射时,光斑几何直径很小(0.1~1 μm);当入射角的绝对值增大,由于离轴光线而产生的彗差增大,相应的成像光斑的几何直径也会变大。虽然 Zemax 的光线追迹是针对主光线定位光斑,可以获得精确的光斑位置,但是真实复眼系统的光斑定位精度会受到衍射、像差、图像传感器像元尺寸的影响,所以在未来的系统中应采用亚像元技术来提升光斑的定位精度。

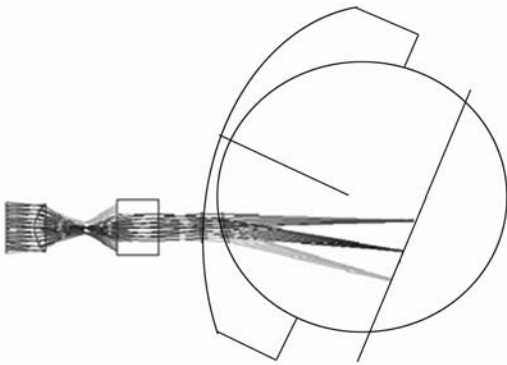


图 2 单通道 Zemax 光线追迹

Fig. 2 Ray tracing of each channel in Zemax

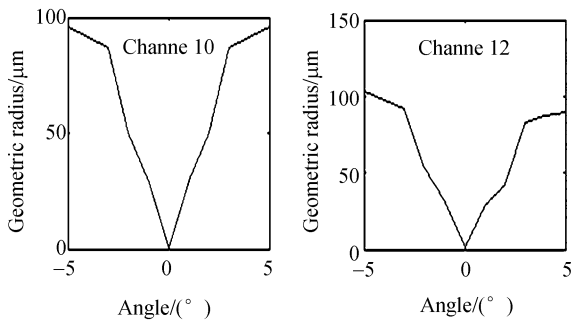


图 3 光斑直径-光束入射角曲线图

Fig. 3 Curve diagrams of geometric radii and incident angles

为了进一步评价复眼模型各通道的成像质量,在 Zemax 中又以一定角度为间隔转动入射光源,建立规则的二维光源转角矩阵,观察该通道内对应的成像,如图 4 所示。由于各通道的成像畸变较为严重,应对每个成像通道进行标定来解决非线性问题,建立物像对应关系的高精度数学模型,以此满足高精度目标探测的需要。

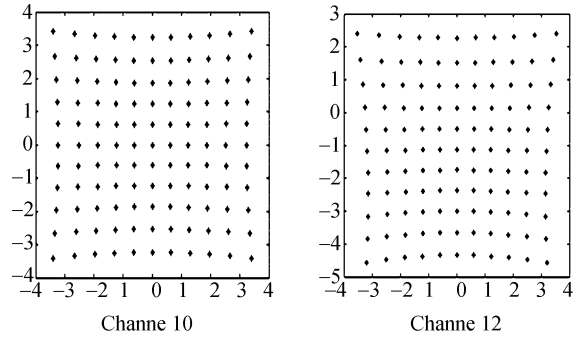


图 4 不同通道的成像畸变

Fig. 4 Imaging distortions of different channels

4 复眼标定与探测仿真

4.1 LM 神经网络标定

本文采用了基于 LM 算法的神经网络建立高精度的物像对应关系。神经网络的结构如图 5

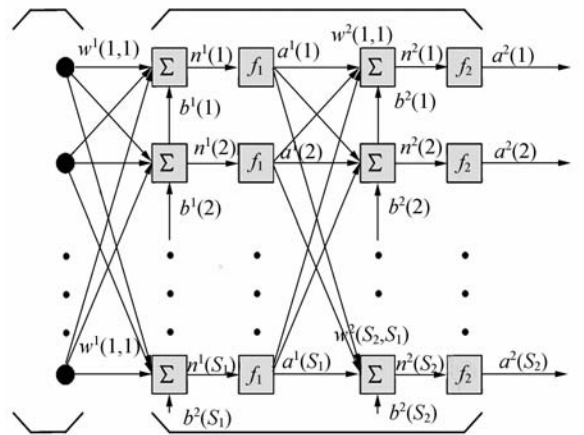


图 5 神经网络结构

Fig. 5 Structure of neural network

所示,网络的权值及阈值为:

$$x = [\omega^1(1,1)\omega^1(1,2)\cdots\omega^1(S_1,R)b^1(1)\cdots b^1(S_1)\omega^2(1,1)\cdots b^M(SM)]^T$$

常用的 BP 算法是基于最速下降法令参数沿着误差梯度相反的方向移动,即训练中权值及阈值的变化 Δx 使误差函数 $V(x) = \sum e_i^2(x)$ 取极小值。

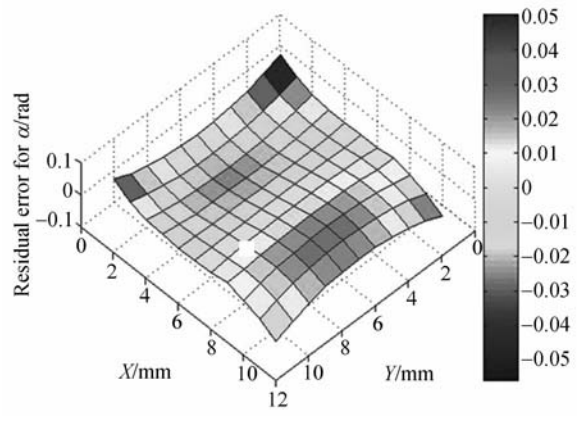
$$\Delta x = -[\Delta^2 V(x)]^{-1} \Delta^2 V(x) = -[J^T(x)J(x)]^{-1} J(x)e(x)$$

$J(x)$ 是雅克比矩阵 $J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial e_1(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_N(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial e_N(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix}$

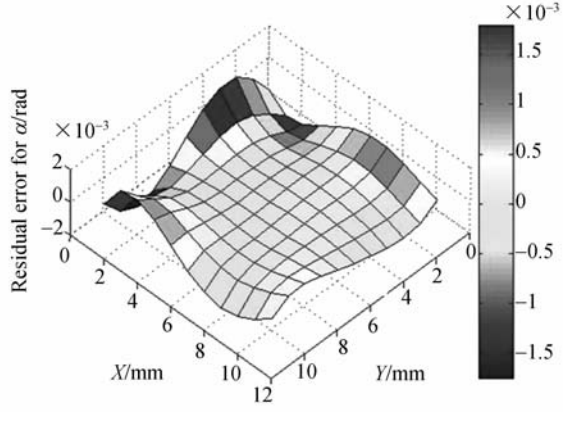
LM 算法是高斯-牛顿法的改进形式:

$$\Delta x = -[J^T(x)J(x) + \mu I]^{-1}J(x)e(x)$$

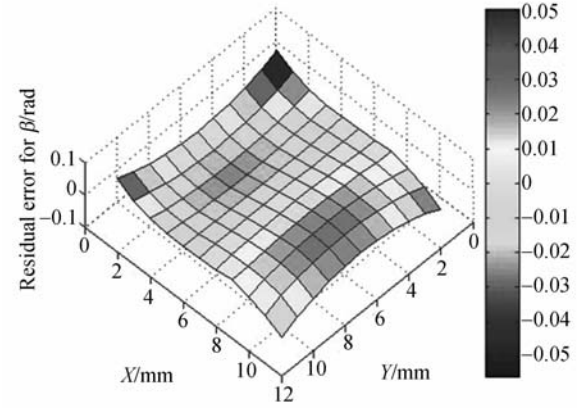
式中 $\mu > 0$ 为常数, I 是单位阵。由于引入了参数 μ , 每次迭代效率显著提高, 可以大为改善其整体性能, 特别是在精度要求高的时候, 该方法既具有高斯-牛顿法的局部收敛性, 又具有梯度法的全局特性, 训练过程非常迅速。



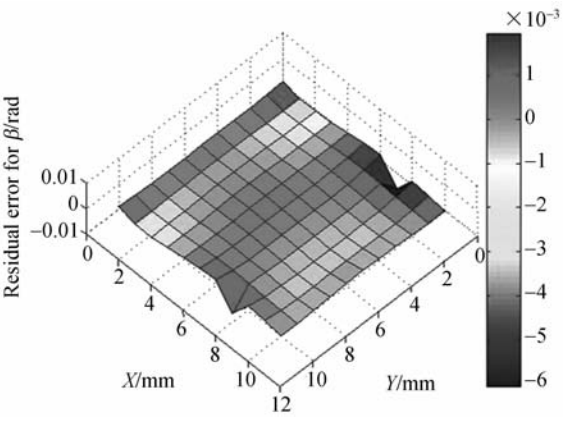
(a)代表 X
(a) Represents X



(a)代表 X
(a) Represents X



(b)代表 Y
(b) Represents Y



(b)代表 Y
(b) Represents Y

图 7 采用二次多项式方法的 2 通道残余误差

Fig. 7 Residual errors using second-order polynomial algorithms in channel 2

的入射角(α_i, β_i)。将追迹光线入射角和图像坐标分别代入神经网络中训练, 然后用 121 组物方入射角和像点坐标检验训练精度。经神经网络预测后 2 通道的残余误差为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ rad(图 6)。为了检验神经网络的效果, 采用同样的数据与传统的二次多项式拟合方法(式 1)对比。仿真结果表明, 二次多项式拟合的残余误差为 10^{-2} rad(图 7), 远远大于神经网络训练后的残余误差。这表明 LM 神经网络算法提供了更高的精度。从理论上讲, 只要设定合理的隐层节点数和足够多的迭代次数, 训练后的神经网络可以达到任意精度的预测, 但是复眼探测的精度同样受其它因素的影响, 因此过高的提升神经网络的预测精度没有太大的意义, $10^{-3} \sim 10^{-4}$ rad 已经可以满足探测

图 6 采用神经网络方法的 2 通道残余误差

Fig. 6 Residual errors for neural network in channel 2

仿真过程中采用了 Matlab 神经网络工具箱, 网络的输入层为像点坐标(x_i, y_i), 输出层为光线

的要求。

$$\begin{cases} \alpha = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6 \\ \beta = b_1x^2 + b_2y^2 + b_3xy + b_4x + b_5y + b_6 \end{cases}, \quad (1)$$

4.2 复眼探测仿真

复眼探测需要多通道信息融合,各通道坐标系应统一在世界坐标系下。如图 8 所示,子通道

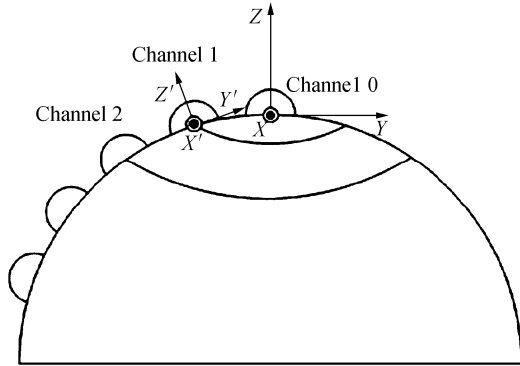


图 8 坐标系定义

Fig. 8 Definition of coordinates system

的坐标原点位于子眼透镜的光学几何中心, z 轴与球冠面在该点的法向方向一致, x 轴和 y 轴分别与球冠面相切。世界坐标系与 0 通道的坐标系重合。在该模型中坐标变换遵循欧式变换的原则,由于复眼分布在球冠面上,坐标之间的变换可以简化为绕 x 的转动 φ 和绕 z 的转动 ψ ,因此子眼坐标系下的方向向量 \mathbf{P} 与该向量在世界坐标系下方向向量 \mathbf{P}' 的坐标变换关系为:

$$\mathbf{P}' = \mathbf{R}\mathbf{P}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \varphi \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \varphi & -\cos \psi \sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}.$$

通过制作过程中的精确控制可以获得子眼的光学几何中心位置坐标 (x_{oi}, y_{oi}, z_{oi}) 。将空间点目标物体 (x, y, z) 在复眼单通道的像点 (x_i, y_i) 代入网络预测,可以获得该通道坐标系下入射光线的方向角 (α_i, β_i) (当目标距离很远时,入射光近似为平行光),继而得到方向向量 $(\mathbf{a}_i', \mathbf{b}_i', \mathbf{c}_i')$,再经过式 (2) 坐标变换可以得到世界坐标系下的入射光线方向向量 $(\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i, \mathbf{c}_i)$,入射光线的直线表达式为:

$$\frac{x - x_{oi}}{\mathbf{a}_i} = \frac{y - y_{oi}}{\mathbf{b}_i} = \frac{z - z_{oi}}{\mathbf{c}_i}$$

将其变换为直线方程的一般式:

$$\begin{cases} A_{i_1}x + B_{i_1}y + C_{i_1}z + D_{i_1} = 0 \\ A_{i_2}x + B_{i_2}y + C_{i_2}z + D_{i_2} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

如果目标物体同时被 n 个成像通道捕捉时,则复眼探测数学模型可以表示为:

$$\begin{bmatrix} A_{1_1} & B_{1_1} & C_{1_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n_2} & B_{n_2} & C_{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_{1_1} \\ \vdots \\ -D_{n_2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

利用最小二乘法解超定方程组 (4),物体的空间三维点坐标可以表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{D}, \quad (5)$$

其中: $\mathbf{X} = [x \ y \ z]^T$, $\mathbf{D} = [-D_{1_1} \ \dots \ -D_{n_2}]^T$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} A_{1_1} & B_{1_1} & C_{1_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n_2} & B_{n_2} & C_{n_2} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_{1_1} & B_{1_1} & C_{1_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n_2} & B_{n_2} & C_{n_2} \end{bmatrix}.$$

为了检验标定和探测算法,仿真中沿一条直线的 6 个点被复眼探测,按照式 (5) 解析其坐标值并与真实值比较。如表 1 所示,各个坐标的相对误差在 3% 以内。造成误差的主要原因是多通道

表 1 探测仿真结果

Tab. 1 Detection and simulation results

Unit: mm

Point	X real	X calculated	Y real	Y calculated	Z real	Z calculated
1	10	10.1	20	20.2	5 000	5 035.2
2	20	20.4	40	40.8	10 000	10 181.7
3	50	50.3	100	100.5	25 000	25 195.5
4	80	81.1	160	162.8	40 000	40 638.7
5	100	102.6	200	203.1	50 000	51 254.9
6	200	195.7	400	389.6	100 000	97 261.1

信息融合必然导致各个通道的参数相互耦合,从而造成误差不断积累。此外,在探测仿真中充分考虑了影响复眼定位精度的因素,将神经网络预测的精度只定位在 10^{-4} rad,而实际上神经网络对角度的预测可以达到更高的精度。但是考虑实际使用中的限制,一味地提高训练精度不仅造成计算上的浪费,而且对提高整体探测精度没有实际意义。

5 结 论

本文针对一种新型的复眼模型进行了标定和探测算法研究,该复眼具有大视场和高灵敏度的优点。利用 Zemax 进行了子眼通道的光线追迹,

并对单通道的成像特性进行了研究。在非线性校正中采用了基于 LM 算法的神经网络建立高精度的物像对应关系。此外,进行了目标探测的算法研究和理论仿真实验,仿真结果表明,各个坐标的相对误差在 3% 以内。这个结果能够很客观地反映复眼位标器的探测精度。复眼是一种牺牲空间横向分辨率来提升角度分辨率的产物,主要应用于运动参数(线速度和角速度)的快速检测。复眼在定位上虽不能达到很高的精度,但是完全可以满足判断高速运动目标方位和距离,实现低空预警的要求。本文是未来复眼大型化和高度集成化的先期探索,在今后的工作中将应用亚像素技术解决光斑定位问题,并探索更好的探测算法来提高复眼整体上的探测精度。

参考文献:

- [1] LAND M F, STAVENGA D G, HARDIE R C, *et al.*. *Variations in the Structure and Design of Compound Eyes*[M]. in Facets Vision, New York: Springer Verlag, 1989,90-111.
- [2] JUSTH E W, KRISHNAPRASAD P S. Steering laws for motion camouflage[C]. *Proceeding Royal Soc. A*, 2006,462:3629-3643.
- [3] BITSAKORS K, FERMULLER C. Depth estimation using the compound eye of dipteran flies[J]. *Biological Cybernetics*, 2006,95:487-501.
- [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] FRANCHESCHINI N, PICHON J, BLANES C. From insect vision to robot vision[J]. *Phil. Trans. Of Royal Soc. of London*, 1992, 337(1281):283-294.
- [6] HOSHINO K, MURA F, MORII H, *et al.*. A small-sized panoramic scanning visual sensor inspired by the fly's compound eye[C]. *Proc. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998,1641-1646.
- [7] LICHTENSTEIGER L, EGGENBERGER P. Evolving the morphology of a compound eye on a robot [C]. *IEEE Proc. Third European Workshop on Advanced Mobile Robotics*, 1999,129 - 134.
- [8] LEVOY M, NG R, ADAMS A, *et al.*. Light field microscopy[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006,25:924-934.
- [9] WILBURN B, JOSHI N, VAISH V, *et al.*. High performance imaging using large camera arrays[J]. *In ACM Transactions on Graphics*, 2005,24(3):765-776.
- [10] ADELSON E H, WANG J Y. Single lens stereo with a plenoptic camera[C]. *IEEE Trans. PAMI*, 1992,14:99-106.
- [11] HORNSEY R, THOMAS P, WONG W, *et al.*. Electronic compound-eye image sensor: construction and calibration[J]. *SPIE*, 2004,5301:13-24.
- [12] KRISHNASAMY R, THOMAS P, PEPIC S, *et al.*. Calibration techniques for object tracking using a compound eye image sensor [J]. *SPIE*, 2004,5611:42-52.
- [13] 张红鑫,卢振武,李凤有,等.重叠复眼光学模型的建立与分析[J]. *光子学报*, 2007,36(6):1106-1109.
ZHANG H X, LU Z W, LI F Y, *et al.*. The building and analysis of the superposition compound Eye's optical model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007,36(6):1106-1109. (in Chinese)
- [14] 张红鑫,卢振武,刘华,等.对重叠复眼进行简化模拟与分析的新方法[J]. *光学精密工程*, 2008,16(10):1847-1851.
ZHANG H X, LU Z W, LIU H, *et al.*. Novel method to simulate and analyze superposition compound eye [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1847-1851. (in Chinese)
- [15] 张红鑫,卢振武,李凤有,等.曲面复眼成像系统

的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3):346-350.

ZHANG H X, LU ZH W, LI F Y, *et al.*. Study on curved compound eye imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):346-350. (in Chinese)

- [16] 陶圣, 曾理江. 结合空间侧抑制的仿生复眼模型

[J]. 光学技术, 2007, 33(3):337-340.

TAO S, ZENG L J. Compound eye model based on the spatial lateral inhibition network[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(3):337-340. (in Chinese)

- [17] 侯亚丽, 李铁. 基于 LM 优化算法的 BP 神经网络目标识别方法[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(1):53-57.

HOU Y L, LI T. Improvement of BP neural network by LM optimizing algorithm in target identification [J]. *Journal of Detection & Control*,

2008, 30(1):53-57. (in Chinese)

- [18] 赵弘, 顾继俊, 林立. 基于 LM 神经网络的钻杆在线漏磁缺陷识别[J]. 装备制造技术, 2009(2):87-89.

ZHAO H, GU J J, LIN L. Drill and casing pipes on-line inspection system based on levenberg-marquardt neural network[J]. *Journal of Equipment Manufacture Technology*, 2009(2):87-89. (in Chinese)

- [19] ZHAN Z X, WANG K Y. Fabrication of aspherical liquid lens controlled by electrostatic force [C]. *Proc. 3rd International Symp. on Advanced Optical Manufac. and Testing Tech.: Advanced Optical Manufacturing Technologies*, 2007:6722-6725.

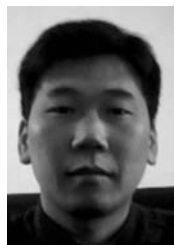
作者简介:



张浩(1984—),男,吉林白城人,硕士研究生,2007年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光电检测和微透镜阵列的制作与应用方面的研究。E-mail: kerqin@mail.ustc.edu.cn



曹兆楼(1988—),男,江苏盐城人,硕士研究生,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事微透镜阵列的制作与应用方面的研究。E-mail: caozhl@mail.ustc.edu.cn



郭方(1977—),男,安徽阜阳人,博士研究生,主要从事光电信号检测方面的研究。E-mail: davidace@mail.ustc.edu.cn



吴青林(1978—),男,安徽安庆人,博士,中国科学技术大学精密机械与精密仪器系在读博士后,主要从事微透镜阵列制作方面的研究。E-mail: wuql@ustc.edu.cn



闫佩正(1989—),男,山东泰安人,中国科学技术大学精密机械与精密仪器系学生,2007年11月至2009年6月参与国家创新性试验计划,2009年至今参与光电信息实验室项目的研究工作。E-mail: ypz@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



王克逸(1962—),男,河北保定人,教授,博士生导师,1995于中国科学院等离子体物理所获工学博士学位,1995至1996年在中国科学技术大学精密机械与精密仪器系读博士后,主要从事近场光学和微光学的教学和科研工作。E-mail: kywang@ustc.edu.cn