

文章编号:1001-5078(2018)12-1515-05

· 光电技术与系统 ·

基于可变焦距的非球面人工复眼定位技术研究

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, 辽宁 沈阳 110159; 2. 沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘 要:针对单层非均一曲面复眼不能实现变焦距成像,子眼微透镜存在较大球差导致成像质量较差等问题,研究了可变焦距的非曲面复眼,实现一定范围清晰成像。介绍了基于复眼结构的人工目标定位实验系统,建立复眼多目定位数学模型。通过曲面复眼采集多通道目标像点,标定变焦距曲面复眼模型中每个子眼位置,利用最小二乘法解算超定性方程组得到目标点的空间三维坐标。开展多目定位实验,结果表明,随着捕获目标点子眼个数增加,目标定位精度越高,当捕获目标的子眼个数大于20个时,目标定位精度在10%以内。提出的复眼成像定位方案具有可行性。

关键词:可变焦距;人工复眼;目标定位;大视场

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.11.012

Research on aspherical compound eyes positioning technology based on variable zoom

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: In view of the problem that single-layer non-homogeneous curved compound eye cannot achieve zoom imaging, sub-eye micro-lens has a larger spherical aberration leads to poor imaging quality and other issues, the non-curved surface of the zoom compound eye is studied to achieve a clear range of imaging. An artificial target positioning experiment system based on compound eye structure is introduced, and a multi eye location mathematical model is set up. A multi-channel target image point is acquired through the compound eye of the curved surface, and the position of each sub-eye in the compound eye model of the zoom surface is calibrated, and the spatial 3D coordinates of the target point are obtained by solving the over-qualified equation group by the least squares method. The multi-target positioning experiment was carried out. The results show that with the increase of the number of target eye points, the target positioning accuracy is higher. When the number of captured sub-eyes is greater than 20, the target positioning accuracy is within 10%. The proposed compound eye imaging positioning scheme is feasible.

Key words: variable zoom; artificial compound eye; target setting; large field of view

1 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

基金项目:国家863计划资助项目(No. 2015AA042701);总装基金项目(No. 9140A05020115QT28057)资助。

作者简介:李 伦(1989-),男,博士研究生,主要从事仿生导航与控制技术研究。E-mail:408907652@qq.com

通讯作者:郝永平(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事微小引信技术及探测技术等方面的 Email:yphsit@126.com

收稿日期:2018-03-30

面具有很高潜在应用价值^[1-2]。复眼特有的多个子眼球面阵列分布的结构以及多个子眼同时捕捉目标点,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、定位以及得到精准的目标识别等任务^[3-6]。人工复眼成像系统根据自然界中昆虫复眼的多个子眼同时探测目标点信息的原理,不断制作改进,Stanford University 的 Levoy 小组开发出集阵相机人工复眼成像系统,采用空间大范围稀疏分布进行成像,可实现超分辨率合成和实时三维成像,但该系统体积庞大,数据采集和传输复杂,不符合结构简单、移动便利发展要求^[7]。清华大学根据昆虫复眼的空间侧抑制机制,设计出一种硬件实现的复眼感应模型^[3,8-10],虽然该系统无法获得运动目标的具体三维坐标,但它采用的触发响应模式可以对运动目标进行快速识别。

本文设计了一种可变焦距的非球面人工复眼,通过对子眼微透镜非球面优化,获得各级子眼微透镜最优尺寸,实现曲面人工复眼一定范围内的变焦清晰成像。搭建了人造复眼多目定位实验系统,建立复眼多目定位数学模型。利用曲面复眼采集目标点多通道目标像点,对采集的图像进行处理,提取目标像点的重心,标定变焦距曲面复眼模型中每个子眼位置,建立目标像点重心与对应子眼入射角度之间关系。利用最小二乘法解算超定性方程组得到目标点的空间坐标。通过实验,验证复眼多目定位算法,结果表明,随着捕获目标点的子眼数目增加,目标定位精度越准确。

2 可变焦距复眼

本文设计的复眼为变焦距曲面结构,曲面基底上阵列共 61 个子眼微透镜,将所有微透镜分为 5 级,各级上的子眼微透镜与中心子眼具有一定的偏转角度,同时每一级上相邻子眼角度也不相同。2~4 级分别有 6、12、18、24 个子眼微透镜。各级微透镜的焦距、曲率半径、数值孔径及冠高均布相同。根据薄透镜计算公式和各级子眼到探测器间的距离,可以得到每一级子眼的尺寸参数。建立变焦距曲面复眼的三维模型。为保证各级子眼能够获得较高的成像质量,同时降低各级子眼的球差,通过 ZEMAX 对复眼模型优化,优化后各级子眼微透镜的尺寸参数如表 1 所示。

表 1 ZEMAX 优化后各级子眼微透镜尺寸参数

Tab.1 The size parameters of subocular microlens after ZMEAX optimization

子眼级数	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
焦距/mm	2.227	2.173	2.009	1.724	1.302
子眼表面曲率半径/mm	0.9298	0.9102	0.895	0.694	0.5149
数值孔径/mm	0.638	0.624	0.59	0.501	0.382
冠高/mm	0.0561	0.0520	0.0489	0.0432	0.0345

根据优化后的尺寸参数,采用模压成型工艺,制备可变焦距曲面人工复眼,如图 1 所示。制备得到直径 $\phi = 8.66$ mm,子眼 $n = 61$ 的人工复眼,且人工复眼无气泡出现。

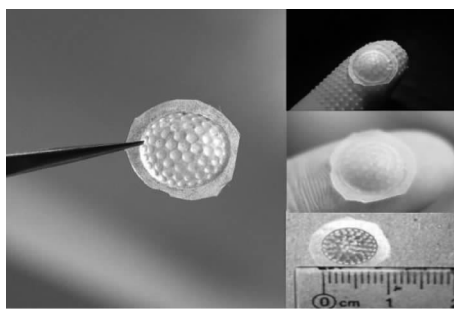


图 1 可变焦距曲面人工复眼

Fig.1 Artificial compound eye with variable focal length

3 人工复眼多目定位数学模型

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。但是在实际成像过程中,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的存在着非线性畸变,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 2 所示。利用建立的两种数学模型解算目标点的空间坐标。

如图 2 所示,子眼透镜中心坐标 $P_{0i}(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i})$,目标点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$,两点间的方向向量 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:

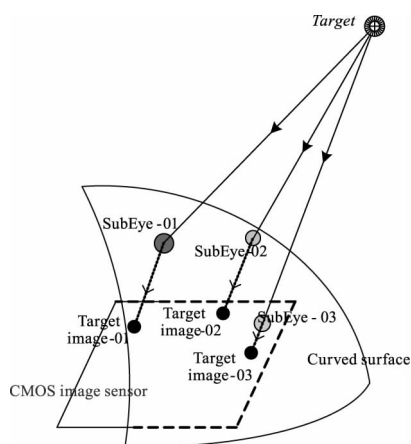


图2 人工复眼多目定位原理图

Fig. 2 The principle map of multi eye location in artificial eye

$$\frac{X_i - X_{0i}}{a_i} = \frac{Y_i - Y_{0i}}{b_i} = \frac{Z_i - Z_{0i}}{c_i} \quad (1)$$

其中, (X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}) 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,因此需要将2~5级子眼的坐标系与主坐标系进行统一,如图3所示。数学模型中的坐标系转换遵循欧拉变换法则。

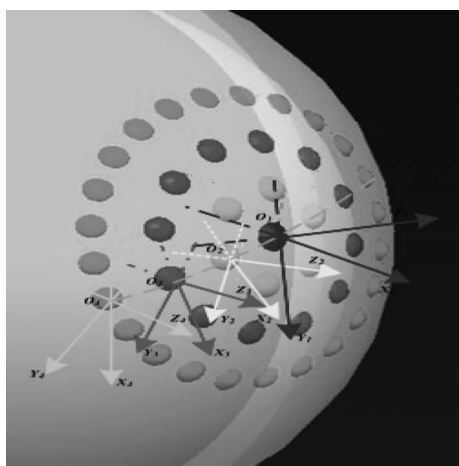


图3 各级子眼坐标系转换示意图

Fig. 3 Transformation of subocular coordinate system at all levels

由欧拉角的转换关系可以得到2~5级子眼坐标系到主坐标系的旋转矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\cos\theta\sin\psi & \sin\psi\sin\theta \\ \sin\psi & \cos\psi\cos\theta & -\sin\theta\cos\psi \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

其中,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,可以推导出子眼坐标系下各级子眼对应的方向向量 p' 与其对应的世界坐标系下的方向向量 p 之间的关系:

$$p = Mp' \quad (2)$$

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 p ,世界坐标系下目标点和透镜之间的线性公式根据公式(3)可得:

$$\begin{cases} A_{i1}x + B_{i1}y + C_{i1}z + D_{i1} = 0 \\ A_{i2}x + B_{i2}y + C_{i2}z + D_{i2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

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用矩阵:

$$RX = D \quad (4)$$

表示。其中矩阵 R 、向量 X 和 D 分别为:

$$R = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & C_{11} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n2} & B_{n2} & C_{n2} \end{bmatrix}; X = [x, y, z]^T$$

$$D = [-D_{11}, -D_{12}, \dots, -D_{n1}, -D_{n2}]$$

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

$$X = N^{-1} R^T D \quad (5)$$

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4所示。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的像。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。

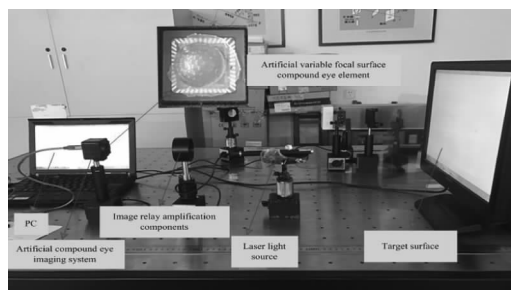


图4 人工复眼定位实验系统

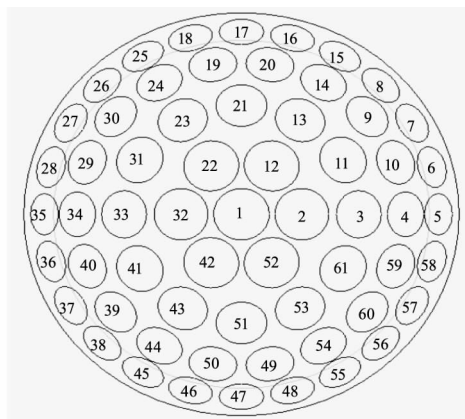
Fig. 4 Artificial compound eye positioning experiment system

图像采集 CMOS 感光面尺寸为 $6.55 \text{ mm} \times 4.92 \text{ mm}$,拥有 2048×1536 个有效像素,每个像素单元尺寸 $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$,通过 USB 输出后 PC 上对图像采集到的各方向上的图像做进一步处理。

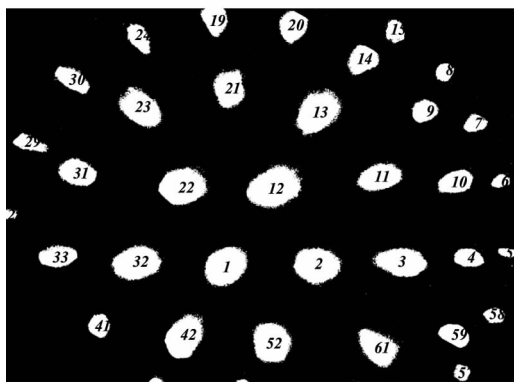
为了便于确定目标定位过程中子眼透镜的坐标,需要对每个子眼透镜进行编号。复眼透镜编号如图5(a)所示。搭建人工复眼定位实验系统,根据实验条件,若要获得目标的三维坐标,需要满足:

- 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,开展实验,采集的各子眼成像信息如图5(b)所示。



(a)复眼透镜编号



(b)人工复眼采集目标像点图像

图5 人工复眼成像通道编号及采集图像

Fig.5 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)。由公式(5)可知,如果目标点被两个及以上的子眼通道捕捉到,就可以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2个、3个、4个、…、20个子眼通道分别进行解算空间目标点 P_0 的三维坐标,如

表2所示。

表2 计算后目标点坐标值

Tab.2 Calculated target point coordinate value

捕获目标点 子眼个数	解算得到 目标点坐标	X方向 误差/%	Y方向 误差/%	Z方向 误差/%
2	(8.48130,4.3735,35.6823)	54.40	65.06	58.02
3	(8.76780,5.0243,38.3295)	52.86	59.86	54.90
4	(9.39870,5.5143,40.0674)	49.46	55.95	52.86
5	(9.59450,5.5663,41.8220)	48.41	55.54	50.79
6	(10.3022,5.7101,42.6291)	44.61	54.39	49.84
7	(9.4464,5.4071,43.2847)	49.21	56.81	49.07
8	(10.2208,5.6696,43.5180)	45.04	54.71	48.80
9	(11.1493,6.0254,46.3066)	40.05	51.87	45.52
10	(12.8394,6.2577,48.8626)	30.97	50.01	42.51
11	(13.9621,6.2632,49.2046)	24.93	49.97	42.11
12	(13.8682,6.2564,49.0375)	25.43	50.02	42.30
13	(13.9867,6.3666,49.3266)	24.80	49.15	41.96
14	(14.9411,6.8690,50.8268)	19.67	45.13	40.20
15	(14.8166,7.4969,57.8406)	20.34	40.12	31.95
16	(15.2169,8.8299,60.5823)	18.18	29.47	28.72
17	(15.6933,8.94870,60.8983)	15.62	28.52	28.35
18	(16.2307,9.7869,65.7329)	12.73	21.82	22.66
19	(16.4409,10.3442,74.2530)	11.60	17.37	12.64
20	(16.8539,10.8893,78.7162)	9.38	13.02	7.39

从表2 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6所示。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。

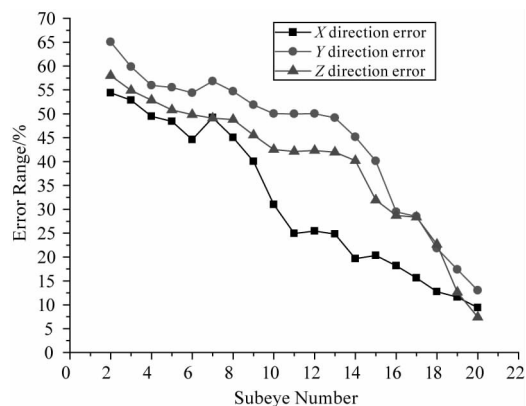


图6 目标点三维坐标误差曲线

Fig.6 Target point three-dimensional coordinate error curve

由于曲面复眼制备过程中存在误差,以及复眼模型与 CMOS 装配误差、目标点测量误差、目标靶面与复眼相机之间距离误差等多方面的原因,导致目前解算出的目标点三维坐标存在较大误差。这些误差方面的问题在以后的实验过程中尽量减少,以提高解算精度。同时优化多目定位模型,提出改进方法,对目标定位误差进行补偿求解。

5 结 论

本文针对非均一曲面复眼模型存在的问题,提出了可变焦距的非均一曲面复眼模型,研究了变焦距曲面复眼模型的设计和非球面子眼的优化,通过对子眼微透镜进行非球面优化降低各级子眼的球差,提高曲面复眼的成像质量。重点探讨了曲面复眼的多目定位方法,通过建立多目定位数学模型,反求出三维目标对应的各通道入射角,最后建立各子眼通道与其像点之间的对应关系,从而实现曲面的多目定位。制备非均一变焦距曲面复眼,通过实验验证曲面复眼的成像效果以及多目定位算法。实验结果显示,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,其目标定位精度能够在 10% 以内。

参考文献:

- [1] DI Si, XU Hongkui, DU Ruxu. New progress of artificial compound eye imaging system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 94 - 96. (in Chinese)
邸思, 徐洪奎, 杜如虚. 人造复眼成像系统研究的新进展[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(4): 94 - 96.
- [2] HAO Yongping, LI Lun. New progress in structure design and imaging systems of artificial compound eye[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1407 - 1412. (in Chinese)
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.
- [3] GUO Fang, WANG Keyi, YAN Peizheng, et al. Calibration of compound eye system for target positioning with large field of view[J]. Opt. Precision Eng, 2012, 20(5): 913 - 920. (in Chinese)
郭方, 王克逸, 闫佩正, 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.
- [4] SHI Lifang, YE Yutang, DENG Qiling, et al. Method to fabricate artificial compound eye[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2462 - 2466. (in Chinese)
史立芳, 叶玉堂, 邓启凌, 等. 制备人工复眼结构的方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2462 - 2466.
- [5] HAO Yongping, LI Lun, YU Junbo. Design and preparation of aspherical compound eye[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(6): 727 - 730. (in Chinese)
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.
- [6] CAO Zhaolou, ZHAN Zhenxian, WANG Keyi. Structure 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] A X Cao, L F Shi, Q L Deng, et al. Structural design and image processing of a spherical artificial compound eye. Optik, 2015, 126(21): 3099 - 3103.
- [8] GUO Shuji, SHI Lifang, CAO Axiu, et al. Study of large field of view compound-eye orientation technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(5): 87 - 92. (in Chinese)
郭书基, 史立芳, 曹阿秀, 等. 基于大视场人工复眼定位技术[J]. 光子学报, 2016, 45(5): 87 - 92.
- [9] ZOU Chenggang. Optical design and simulation of the artificial compoundeyes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
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.
- [10] LEI Weining, GUO Yunzhi, GAO Tingting. Study on the structure of large field view detection system based on bionic compound eye[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 14(3): 62 - 66. (in Chinese)
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]. 光学与光电子技术, 2016, 14(3): 62 - 66.