

引用格式: ZHU Shuaimin, GUO Wenge, LIU Tao, et al. Target Localization Technology Based on Biomimetic Curved Compound Eye Camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(9):0911003

朱帅民, 郭文阁, 刘韬, 等. 基于仿生曲面复眼相机的目标定位技术[J]. 光子学报, 2023, 52(9):0911003

## 基于仿生曲面复眼相机的目标定位技术

朱帅民<sup>1</sup>, 郭文阁<sup>1</sup>, 刘韬<sup>1</sup>, 张远杰<sup>2,3</sup>, 许黄蓉<sup>3</sup>, 武登山<sup>2</sup>, 周晓军<sup>2</sup>, 鱼卫星<sup>2,3</sup>

(1 西安石油大学 理学院, 西安 710065)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 西安 710072)

(3 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049)

**摘要:**开展了基于仿生曲面复眼相机的空间目标定位实验研究。采用 CALibration Tag 标定板结合 MATLAB 标定工具箱对自研仿生复眼相机进行内外参数的标定。针对目标的三维定位,从曲面复眼相机成像原理出发并利用相机定标参数,确定目标点在复眼相机中各子眼坐标系下坐标的线性关系并建立线性方程组,通过最小二乘法进行求解以获得目标点的准确空间定位。设计了光斑定位实验,实验结果表明,在至少 4 m 的工作距离内,仿生曲面复眼相机的定位误差可以控制在 2% 以内,该方法应用于仿生曲面复眼相机能够实现较高精度的目标定位。在此基础上,采用尺度不变特征变换算法实现了两个子眼所拍摄子图像的特征点粗匹配,结合随机抽取一致算法去除错误匹配点,进而由特征点在子眼像素坐标系中的二维坐标反演出其在空间坐标系中的三维坐标,最后通过对所有点进行点云拼接获得完整的重构点云。实验结果表明,对距离相机约 0.6 m 处的边长为 5.5 cm 的正方体可以实现较好的三维立体重构。

**关键词:**多通道成像;相机标定;图像处理;三维定位;三维重构

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235209.0911003

### 0 引言

传统的单孔径成像系统通常只能得到目标的几何图像信息,而复眼视觉系统由于具有大视场、大景深、可获得目标深度信息和对快速运动目标敏感等优点,在深空探测、安防监控、人工智能导航等领域有广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。使用视觉系统对目标定位是其对目标进行三维探测的必要步骤,目前常见的方法是利用双目视觉系统根据视差原理来对目标进行定位。然而,双目视觉系统因为只存在一组视差关系,约束条件较少,所以定位精度不是很高。此外双目视觉系统的测量距离与基线大小直接相关,因此远距离测量情况下就要求基线距很大,而大基线距会造成系统体积过大。复眼视觉系统在基线固定的条件下,可以通过增加约束条件从而减小测量误差,因而在目标定位方面具有独特的优势并引起了研究者的关注。瑞士洛桑联邦理工大学的 AFSHARI H 等设计研制出了由约 100 个子相机组成的复眼相机阵列,每个子相机具有单独视场和焦点,能够实现大视场成像<sup>[3]</sup>。MALYARCHUK V 等由火蚁复眼得到启发,研制成功了具有 180 个子眼的半球型复眼系统,视场范围达到了 160°,但该成像系统分辨率不高,成像效果不好<sup>[4]</sup>。2014 年,四川大学刘艳等通过构建多组双目测量系统,求解空间中目标点的三维坐标并求取平均值,以此来对目标定位和三维重构<sup>[5-6]</sup>。该定位方法的精度达到  $2.53 \times 10^{-4}$  rad,但由于相机阵列平面分布,所以该定位系统视场较小。2016 年,郭书基等设计制作了 19 眼的曲面复眼相机<sup>[7]</sup>,根据相机针孔成像原理和像素坐标系与空间坐标系的线性关系建立复眼定位模型。2017 年,中国科学技术大学何建争等基于复眼系统特征<sup>[8-9]</sup>,提出一种基于

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 61975231, 61475156),西安石油大学研究生联合培养基地项目,西安石油大学创新与实践能力培养项目(No. YCS21213246)

**第一作者:**朱帅民, 1464189765@qq.com

**通讯作者:**鱼卫星, yuwx@opt.ac.cn; 郭文阁, wguo@xsyu.edu.cn

**收稿日期:**2023-04-20; **录用日期:**2023-05-17

<http://www.photon.ac.cn>

双球面标定的目标定位方法。距离复眼相机 0.83 m 处,定位误差最大为 0.5%,但其复眼系统结构复杂,系统装配技术和平台调节都会对定位精度产生影响。2018年,沈阳理工大学李伦等利用模压成型工艺设计并制作了具有 61 个子眼的复眼相机,根据坐标系间的变换关系建立了目标定位数学模型,并进行了目标定位实验,随着参与定位子眼数目的增多,目标定位精度有效提高,当子眼数目达到 20 时,定位误差降至 10% 以下<sup>[10]</sup>。2020年,南昌大学高文静等提出一种对目标方位角的快速检测算法,以及基于视差原理的复眼系统定位模型,通过实验实现了对运动目标的方位以及距离测量,在短距离测量范围内,测量误差小于 10 mm<sup>[11]</sup>。2021年,中国科学院大学袁泽强等设计并制造了包含有 17 个子眼的曲面复眼相机。利用该相机设计了基于非平行双目三角测量的目标定位方法<sup>[12]</sup>,该复眼相机在 3.15 m 距离处定位误差最大为 2.31%。2022年,西安光机所刘晋亨等提出了一种基于人工仿生曲面复眼相机的三维测量方法<sup>[13]</sup>,将捕捉到目标的子眼构造为多组双目系统来对目标进行测量,将多组测量结果的平均值作为最终测量结果。以此方法对目标点进行距离测量及三维成像,在 3.2 m 范围内,该方法的测距误差最大为 5%。这种测量方法相较于传统的双目测量方法提高了测量精度,增强了鲁棒性。但这种测量方法适用的工作距离较短,误差会随测量距离大幅上升。

本文在实验室研制的仿生曲面复眼相机<sup>[14]</sup>的基础上研究该相机在三维测量方面的优势,提出了一种适用于复眼相机的目标定位算法。该方法根据目标在子眼像素坐标系中的坐标与在世界坐标系中的坐标的对应关系及标定的复眼相机各子眼相机内外参数建立方程组,使用最小二乘法解方程组来获得目标的空间位置,通过增加约束有效提高了复眼相机的测量精度。根据目标定位算法进行了测距实验,实验结果表明,在 4 m 的工作范围内,复眼相机测量误差最大为 2%。相较于采用传统双目测量方法<sup>[13]</sup>,所提测量方法在相同距离 3.2 m 处,误差下降了约 3.5%。在目标定位基础上利用尺度不变特征转变(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)特征检测与匹配算法及随机抽取一致(Random Sample Consensus, RANSAC)优化算法来获取精确的子图像匹配点对,提出了一种三维点云重构算法,设计并进行了物体重构实验,对空间立体目标实现了较好的三维点云重构,验证了仿生曲面复眼相机目标定位和三维重构的可行性和准确性。

## 1 仿生曲面复眼相机结构

图 1(a)和(b)分别为所用曲面复眼相机的原理和实物图。该相机由曲面复眼、光学中继系统和高清晰度图像传感器三个子系统构成,具有实现大视场远距离目标探测、体积小、结构紧凑的特点<sup>[15-16]</sup>。相机包含了在直径 136 mm 的金属半球壳上按照六边形蜂窝状排布的 127 个子眼,子眼直径为 7.4 mm,单个子眼的视场角为 14°,相邻子眼光轴间的夹角为 7°。相机系统焦距为 5 mm,最大视场约为 98°×98°,角分辨率为 1.8 mrad,系统尺寸为  $\Phi 123 \text{ mm} \times 195 \text{ mm}$ ,总质量为 1.35 kg。焦平面探测器采用索尼公司生产的型号为 NOIP1SN025KA 的图像传感器,该图像传感器读出帧频为 13 帧/s,像元大小为 5 120×5 120,像元尺寸为 4.5  $\mu\text{m}$ ,像面尺寸为 23 mm×23 mm。

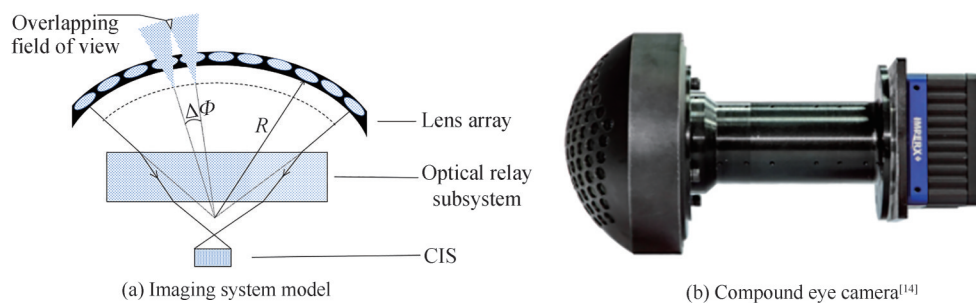


图 1 仿生复眼相机系统

Fig.1 Biomimetic compound eye camera system

## 2 仿生曲面复眼相机定位原理

传统的双目视觉定位方法是基于同一目标点在两台相机成像平面上的位置偏差来测量深度信息,这种

测量方法受两台相机之间基线的约束,在远距离测量中误差较大,且两台相机只有一组约束条件。与双目视觉定位相比,基于仿生曲面复眼相机的多目定位技术通过增加参与目标定位子眼的数目,进一步增加了约束条件,从而有效提高了目标定位精度。

### 2.1 物像直线模型

如图2,设空间目标中特征点 $P$ 在世界坐标系中的坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w)$ ,其在仿生复眼相机的某子眼像素坐标系上的投影像素坐标为 $p_i(u_i, v_i)$ ,考虑到仿生复眼相机的结构和子眼大小,可用针孔成像模型得到 $P$ 与 $p_i$ 的关系,表示为

$$z_c \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $z_c$ 为尺度因子, $f_x, f_y$ 为子眼焦距, $(u_0, v_0)$ 为主点坐标, $f_x, f_y, u_0, v_0$ 为子眼内部参数。 $\mathbf{R}, \mathbf{T}$ 为子眼外部参数, $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵, $\mathbf{T}$ 为平移向量。由式(1)可以得到一条通过 $p_i, P$ 两点的直线,而至少两条直线相交才能确定一点位置,所以最少需要两个视场重叠的子眼才能对特征点定位。特征点与其在两个子眼图像上的像点定义两条直线,这两条直线相交于空间中的一点即为被测特征点。将双目定位推广到多目定位,多条直线相交于一点可以使特征点定位更加准确。

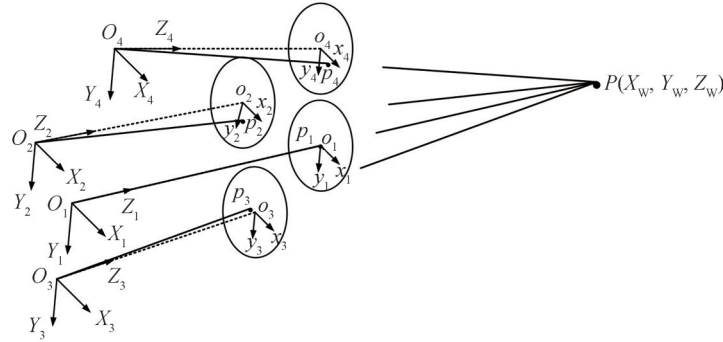


图2 复眼定位原理

Fig.2 Positioning principle of compound eyes

### 2.2 多目定位数学模型

如图2,空间中点 $P$ 在子眼1、2、3、4的图像平面上的像点分别为 $p_1, p_2, p_3, p_4$ 。令世界坐标系与子眼1的相机坐标系重合,那么子眼1、2、3、4的像素坐标系与世界坐标系的变换关系可表示为

$$z_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, z_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_2 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2 & \mathbf{T}_2 \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, z_3 \begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_3 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_3 & \mathbf{T}_3 \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, z_4 \begin{bmatrix} u_4 \\ v_4 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_4 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_4 & \mathbf{T}_4 \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

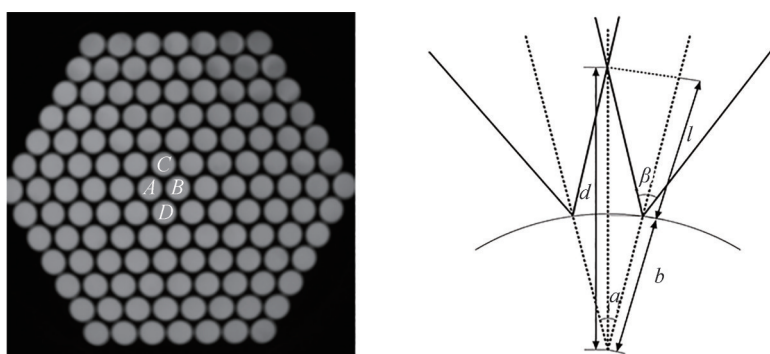
式中, $z_i(i=1,2,3,4)$ 为尺度因子, $\mathbf{K}_i(i=1,2,3,4)$ 为各子眼的内部参数矩阵; $\mathbf{R}_i(i=2,3,4), \mathbf{T}_i(i=2,3,4)$ 分别为各子眼相对于1号子眼的外部参数,子眼内外参数可由相机标定获得;像点像素坐标 $(u_i, v_i)(i=1,2,3,4)$ 由MATLAB软件编写程序获得。由式(2)建立超定方程组,利用最小二乘法解方程组即可求得目标在世界坐标系中的三维坐标。

### 2.3 视场重叠分析

图3(a)给出了实验室研制的仿生复眼相机相邻子眼的两种排布方式,A、B两个相邻子眼光轴夹角为 $7^\circ$ ,C、D两个相邻子眼光轴夹角为 $12.13^\circ$ 。图3(b)为相邻子眼视场重叠示意,用来分析相邻子眼视场重叠以获得双目定位和四目定位的临界物距 $l$ 。由几何关系可得

$$l = \frac{\left[ b \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{b \sin \frac{\alpha}{2}}{\tan \left( \frac{\beta - \alpha}{2} \right)} \right] \sin \frac{\alpha}{2}}{\tan \frac{\beta}{2}} \quad (3)$$

由仿生复眼相机结构可知,  $b=68$  mm, 为复眼支撑球壳半径;  $\alpha=7^\circ$  或  $12.13^\circ$ , 为相邻子眼光轴夹角;  $\beta=14^\circ$ , 为子眼视场;  $d$  表示两相邻子眼边缘视场交点与复眼相机子眼排布曲面的中心位置之间的长度。经计算可得, 两种相邻子眼发生视场重叠的临界物距分别为  $67.5$  mm 与  $436.9$  mm。即距离  $l > 67.5$  mm 时, 两个子眼发生视场重叠; 当距离  $l > 436.9$  mm 时, 4个子眼发生视场重叠。因为单个子眼视场角只有  $14^\circ$ , 所以最多有4个子眼视场能同时拍摄到同一个特征点, 即最多有4个子眼能够对空间点进行定位。



(a) Schematic diagram of two adjacent sub eyes (b) Overlapping field of view of adjacent sub eyes

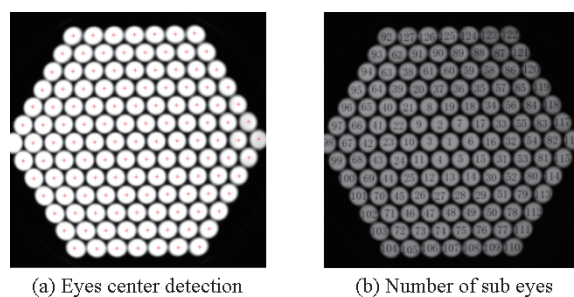
图3 相邻子眼重叠视场分析

Fig.3 Analysis of overlapping fields of view for adjacent sub eyes

### 3 仿生曲面复眼相机标定

采用张正友标定法利用平面标定板对复眼相机参数进行标定, 传统平面标定板必须完整被相邻子眼同时拍摄到, 否则无法识别角点空间坐标。本文所用的具有127个子眼的复眼相机单个子眼的视场较小, 很难拍摄到完整的棋盘格, 因而引入一种新的标定靶标 CALTag (CALibration Tag) 标定板<sup>[17]</sup>, CALTag 标定板在传统平面标定板的基础上添加了编码信息, 因为其每个标记都是唯一的, 可以从数据表格中查找丢失的标记, 所以在标定板部分被遮挡或者拍摄不完整的情况下依然可以进行相机标定。除此之外, 在光照条件变化较大和拍摄角度差的情况下也能进行相机标定, 因此可以用于复杂环境中的相机标定。除了应用于相机标定, 自识别标记也可应用于机器人视觉导航以及增强现实等领域。

利用Hough圆检测算法检测出各子眼的子图像的圆心, 如图4(a)。根据子眼的圆心坐标对子眼进行编号, 如图4(b)。



(a) Eyes center detection

(b) Number of sub eyes

图4 圆心检测和子眼排序

Fig.4 Center detection and sub eyes sorting

使用复眼相机改变相机位置和姿态拍摄 35 幅标定板图像,保证每个子眼拍摄到的标定板能覆盖整个视场。图 5(a)为复眼相机对标定板拍摄一次获得的原始图像。图 5(b)为对应的中心子眼图像。

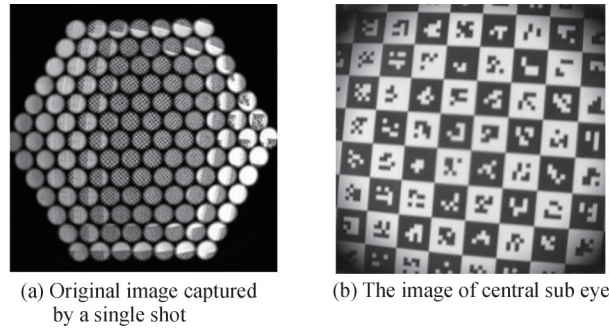


图 5 复眼相机拍摄到的标定板图像

Fig.5 Calibration board image captured by compound eye camera

通过单目标定得到的部分子眼内部参数如表 1。根据内部参数的标定结果计算重投影误差均在 0.3 pixels 以下,  $c_x, c_y$  表示相机光轴在图像坐标系中的偏移量,以像素为单位。

表 1 部分子眼内部参数

Table 1 Internal parameters of some sub eyes

Number of sub eyes	$c_x/\text{pixel}$	$c_y/\text{pixel}$	$f_x/\text{pixel}$	$f_y/\text{pixel}$	Reprojection error/pixel
1	162.53	164.66	1 101.9	1 102.9	0.249 7
2	156.83	143.34	1 109.1	1 108.6	0.259 4
3	177.68	156.28	1 092.8	1 092.5	0.270 8
4	113.16	156.18	1 098.9	1 102.5	0.277 1

以 1 号子眼相机坐标系为基准坐标系,部分相邻子眼外部参数矩阵如表 2。因为旋转矩阵元素的对称性,旋转矩阵  $R$  可转换为旋转向量  $R_{om}$ ,  $T$  为平移向量。

表 2 部分相邻子眼的外部参数

Table 2 External parameters of some adjacent sub eyes

Adjacent sub eye number	$R_{om}$	$T$
2	$[-0.135\ 4\ 0.073\ 0\ -0.002\ 1]^T$	$[-5.588\ 5\ -10.134\ 8\ -1.016\ 4]^T$
3	$[-0.004\ 6\ 0.172\ 7\ -0.000\ 5]^T$	$[-11.357\ 3\ -0.008\ 8\ -1.301\ 7]^T$
4	$[0.157\ 0\ 0.059\ 5\ 0.002\ 1]^T$	$[-5.794\ 8\ 9.745\ 9\ -2.438\ 4]^T$

#### 4 仿生曲面复眼相机测距实验

基于所述的目标定位算法以及相机标定,设计了仿生曲面复眼相机测距实验以衡量其测距精度。实验器材包括激光测距仪、用于形成光斑的纸板和仿生曲面复眼相机。首先将复眼相机固定放置,调整激光测距仪使激光投射至子眼中心,然后固定激光测距仪。激光测距仪到子眼的直线距离作为基准距离  $L$ ,将纸板放置在测距仪与复眼相机之间,使用激光测距仪测得测距仪与激光光斑的直线距离为  $M$ ,则可得到光斑与复眼相机之间的距离  $Z$  为  $L - M$ ,如图 6(a)。复眼相机拍摄到光斑的图像如图 6(b)。实验选用型号为 ZBLW-40,工作范围为 0.05~40 m,测量精度为  $\pm 2$  mm 的激光测距仪,激光测距仪发射的激光波长为 650 nm,激光功率为 1 mW。从 900 mm 开始,以每次 600 mm 的步长将光斑远离复眼相机,每次移动记录光斑与激光测距仪的距离。

采用 MATLAB 软件编写程序,利用灰度质心法获得光斑质心在各子眼像素坐标系中的坐标。根据所述定位模型,得到光斑质心空间坐标为  $(x, y, z)$ 。光斑与复眼相机的距离  $X$  可表示为

$$X = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4)$$

测量相对误差  $\Delta P$  的表达式为

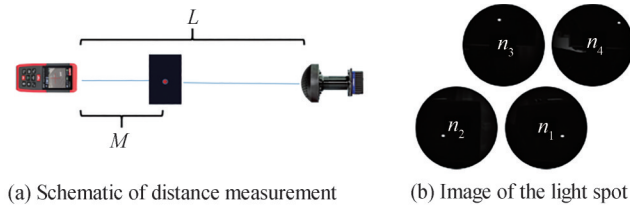


图6 光斑定位示意

Fig.6 Schematic of light spot location

$$\Delta P = \left| \frac{X - (L - M)}{L - M} \right| \times 100\% \quad (5)$$

如图6(b),以 $n_1$ 号子眼为基准,其他3个相邻子眼分别与 $n_1$ 号子眼组成3组双目测量系统,3组三目测量系统以及1组四目测量系统。根据所述目标定位原理分别利用不同目数的测量系统对光斑距离复眼的距离进行测量。

图7为3组双目测量系统、3组三目测量系统以及四目测量系统的测量结果对比。3组双目测量系统在4 m工作范围内的平均测量误差为2.32%;3组三目测量系统在4 m范围内的平均测量误差为1.73%;四目测量系统在4 m工作范围内的平均测量误差为1.44%。实验结果表明,随着参与测量的子眼数目的增加,测量误差逐渐减小。这是因为子眼数目的增多使解算光斑空间坐标的方程数目增多,增加了计算约束从而减小了测量误差。

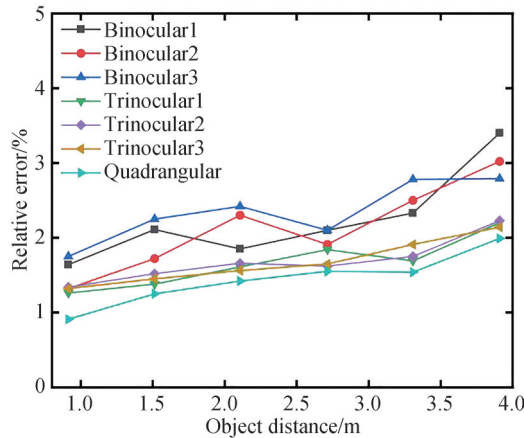


图7 不同目数的测量系统测量结果对比

Fig.7 Comparison of measurement results of measurement systems with different sub eye quantity

实验过程中,激光测距仪在每次发射激光时因人工操作发生轻微抖动,使激光投射在纸板上的光斑在相机成像平面上的质心位置发生偏移,给测量结果带来一定误差。通过实验对这种误差进行定量分析。

将激光测距仪与复眼相机相对放置,以每次0.6 m的步长移动纸板,每次拍摄15张光斑图像,求取15幅图像的光斑质心坐标 $(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, \dots, 15$ ),计算光斑质心坐标 $x$ 方向和 $y$ 方向的平均值与标准差,标准差可表示为

$$\sigma_x = \sqrt{(n-1)^{-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{(n-1)^{-1} \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

激光光斑的尺寸随光斑与复眼相机之间的距离增大而逐渐减小。已知复眼相机单个像素大小约为 $4.5 \mu\text{m}$ 。以图6(b)中的 $n_1$ 号子眼所拍摄到的光斑为例,对不同距离处的光斑进行圆拟合处理,随着距离增大,光斑尺寸变化如表3。

表4为与复眼相机不同距离处, $n_1$ 号子眼图像中光斑质心坐标在图像坐标系中 $x, y$ 坐标轴上的偏差。

表3 不同距离光斑尺寸  
Table 3 Spot size at different distances

Distance/mm	900	1 500	2 100	2 700	3 300	3 600	3 900
Illuminance area/mm <sup>2</sup>	$3.85 \times 10^{-3}$	$2.29 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-3}$	$0.62 \times 10^{-3}$	$0.25 \times 10^{-3}$	$0.15 \times 10^{-3}$

表4 不同距离光斑质心坐标偏差  
Table 4 Coordinate error of centroid of light spot at different distances

Z/mm	Standard deviation in x direction/pixel	Standard deviation in y direction/pixel
900	0.039	0.059
1 500	0.049	0.063
2 100	0.057	0.059
2 700	0.064	0.071
3 300	0.085	0.095
3 900	0.135 3	0.173 9

按以上方法计算拍摄到光斑的子眼子图像中光斑质心坐标的偏差,将平均值作为光斑质心坐标真值  $m(x_i, y_i)$ ,测量坐标为  $m'[(x + \Delta x)_i, (y + \Delta y)_i]$ ,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  为光斑质心坐标偏移标准差。利用所述目标定位数学模型求得其在空间坐标系中的三维坐标分别是  $M(X, Y, Z)$ 、 $M'(X', Y', Z')$ , 误差  $p$  表示为

$$p = \left| \frac{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} - \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2}}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

由此可以计算得出在不同距离处激光测距仪抖动对目标定位造成的误差,如表5。

表5 光斑质心偏移引起的定位误差  
Table 5 Positioning error caused by centroid shift of light spot

Z/mm	900	1 500	2 100	2 700	3 300	3 900
Relative error	0.08%	0.15%	0.16%	0.2%	0.25%	0.31%

表5为不同距离处因激光测距仪抖动导致的定位误差。随着测量距离的增加,激光测距仪抖动造成的光斑质心偏差增大,进而导致定位误差变大。

## 5 仿生曲面复眼系统三维重构实验

根据前述的仿生曲面复眼样机进行空间目标的三维重构实验,以覆盖斑点的正方体作为重构目标。三维重构实验中选用的正方体边长为 55 mm,正方体每个面上覆盖  $11 \times 11$  个黑色斑点,斑点直径为 4 mm,相邻斑点圆心间距约为 6 mm。因为相机分辨率有限,为了尽可能多地得到匹配点对,根据目标的大小在距离相机约 600 mm 处对正方体进行拍摄。

对原始图像进行分割,选择完整拍摄到目标的两幅子图像。利用 MATLAB 编写程序,使用 SIFT 特征检测和匹配算法进行子图像的粗匹配,得到 1 154 组匹配点对,如图 8(a)、(b)。然后使用 RANSAC 算法去除错误匹配点,得到 665 组精确匹配点对,如图 8(c)。

对子图像特征点进行匹配之后,得到特征点在不同子眼像素坐标系中的像素坐标,根据所述复眼定位算法求得各特征点在空间坐标系中的三维坐标,得到目标重构点云,并根据点云深度信息对重构点云进行渲染,如图 9。点云颜色由近到远逐渐变化,真实反映了目标的深度信息。因为相机分辨率及周围环境光照因素影响,部分特征点未能匹配,导致重构点云部分区域缺失。

为了验证三维重构的精度,以斑点圆心作为特征点,根据特征点在像素坐标系中的像素坐标对应的空间坐标,计算两个特征点之间的距离作为测试值,与待测目标上对应的两个特征点之间距离的真实值进行对比,以此衡量三维重构的精度。其中,每两个相邻斑点的圆心间距为 6 mm。选取 5 组斑点,对它们的距离进行计算,计算结果如表 6。

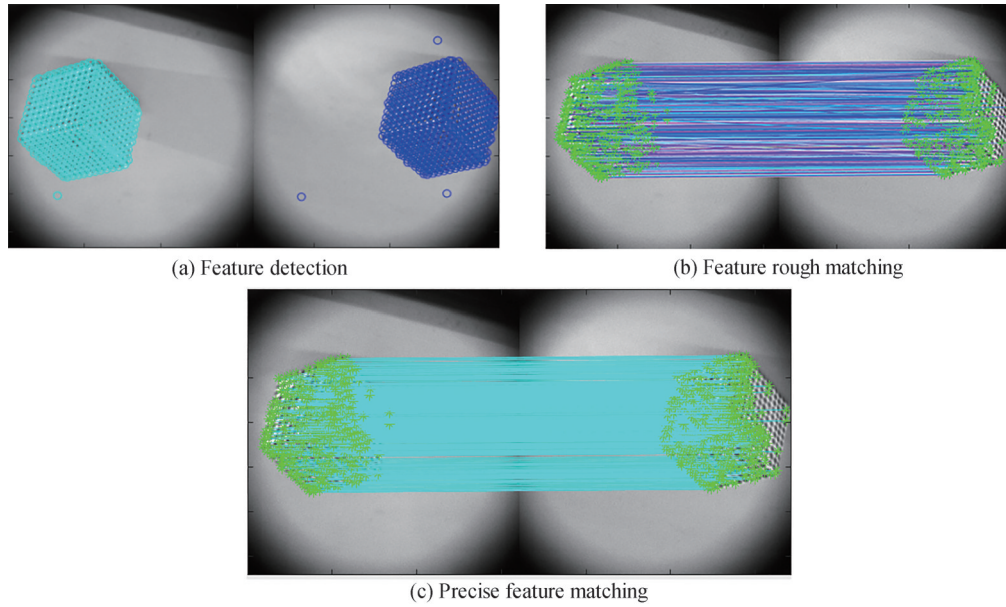


图8 特征点匹配流程  
Fig.8 Feature point matching process

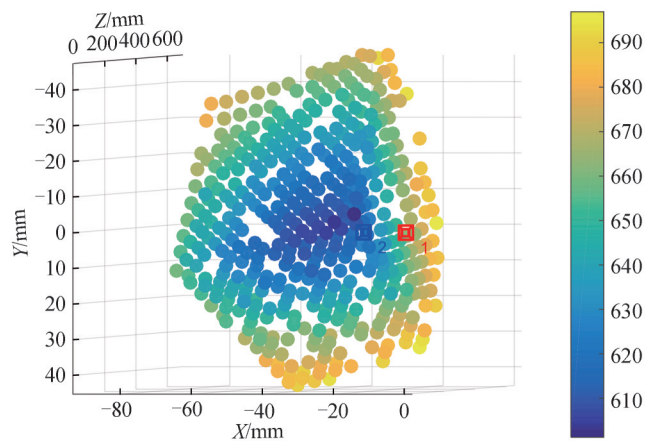


图9 目标重构点云  
Fig.9 Reconstruction point cloud of the target

表6 特征点间距测量结果  
Table 6 Measurement results of feature point spacing

Measured distance/mm	5.91	5.89	5.92	12.23	11.86
Real distance/mm	6	6	6	12	12
Error/%	1.50%	1.83%	1.33%	1.92%	1.17%

5组测量值与真实值比较误差均在2%以下,说明仿生曲面复眼相机可以对空间目标进行较高精度的三维重构。误差主要来源于:环境光照条件不均匀以及复眼相机分辨率不是很高,造成特征点匹配的精度降低,重构出的三维点云存在误差。

## 6 结论

本文提出一种基于实验室自研的仿生曲面复眼相机的多目定位数学模型,采用CALTag标定板结合MATLAB标定工具箱对复眼相机内外参数进行标定。根据定位模型开展了定位实验,实验结果表明,在



4 m的工作范围内,复眼相机测量误差最大为2%,有效提高了相机的定位精度。结合特征点匹配算法与目标定位数学模型建立点云重构算法,实现了空间目标的三维点云重构。研究结果表明仿生曲面复眼相机在目标定位、三维重构以及光学导航等领域具有很大的发展潜力和应用前景。

#### 参考文献

- [1] BESL P J, JAIN R C. Three-dimensional object recognition[J]. *ACM Computing Surveys*, 1985, 17(1): 75-145.
- [2] CHAI Y. In-sensor computing for machine vision[J]. *Nature*, 2020, 579(7797): 32-33.
- [3] AFSHARI H, JACQUES L, BAGNATO L, et al. The PANOPTIC camera: a plenoptic sensor with real-time omnidirectional capability[J]. *Journal of Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology*, 2013, 70(3): 305-328.
- [4] SONG Y M, XIE Y, MALYARCHUK V, et al. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye[J]. *Nature*, 2013, 497(7447): 95-99.
- [5] LIU Yan, GOU Jian, YIN Shaoyun, et al. Design of three-dimensional positioning system for artificial compound eye imaging [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2014, 41 (5): 89-94.  
刘艳, 苟健, 尹韶云,等. 人工复眼成像三维定位系统设计[J]. *光电工程*, 2014, 41(5): 89-94.
- [6] LIU Yan, SHI Lifang, SHI Ruiring, et al. An artificial compound eye system for large field imaging [C]. *SPIE*, 2012, 8558: 335-340.
- [7] GUO Shuji, SHI Lifang, CAO Axiu, et al. Artificial compound eye positioning technology based on large field of view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45 (5): 0512003.  
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): 0512003.
- [8] HE Jianzheng. Research on calibration and positioning of spherical bionic compound eye [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.  
何建争. 球面仿生复眼的标定与定位研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [9] ZHU Qitao, HE Jianzheng, JIAN Huijie, et al. Research on improving the positioning accuracy of bionic compound eye [J]. *New Technology & New Process*, 2019 (9): 61-66.  
朱其涛, 何建争, 简慧杰,等. 提高仿生复眼定位精度研究[J]. *新技术新工艺*, 2019(9): 61-66.
- [10] 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): 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.
- [11] GAO Wenjing, YANG Yuli, XING Qiang, et al. Compound eye binocular vision ranging method based on target motion [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 571-579.  
高文静, 杨预立, 邢强,等. 基于目标运动的复眼式双目视觉测距法[J]. *应用光学*, 2020, 41(3): 571-579.
- [12] YUAN Zeqiang, GU Yuzhang, QIU Shoumeng, et al. Calibration and target localization of multi camera biomimetic curved compound eyes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0911005.  
袁泽强, 谷宇章, 邱守猛,等. 多相机式仿生曲面复眼的标定与目标定位[J]. *光子学报*, 2021, 50(9): 0911005.
- [13] LIU Jinheng, ZHANG Yuanjie, XU Huangrong, et al. Long-working-distance 3D measurement with a bionic curved compound-eye camera[J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 36985-36995.
- [14] XU Huangrong, LIU Jinheng, ZHANG Yuanjie, et al. Unmanned airborne surface bionic compound eye imaging velocity measurement system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0911004.  
许黄蓉, 刘晋亨, 张远杰,等. 无人机载型曲面仿生复眼成像测速系统[J]. *光子学报*, 2021, 50(9): 0911004.
- [15] YU Xiaodan, ZHANG Yuanjie, WANG Yuanyuan, et al. Optical system design of small unmanned aerial wide-field compound eye camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(7): 0722003.  
于晓丹, 张远杰, 王元元,等. 小型无人机载大视场复眼相机光学系统设计[J]. *光子学报*, 2019, 48(7): 0722003.
- [16] XU Huangrong, ZHANG Yuanjie, WU Dengshan, et al. Biomimetic curved compound-eye camera with a high resolution for the detection of distant moving objects[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 6863-6866.
- [17] ATCHESON B, HEIDE F, HEIDIRCH W. CALTag: high precision fiducial markers for camera calibration [C]. *Proceedings of the Vision, Modeling, and Visualization Workshop 2010*, 2010: 41-48.

## Target Localization Technology Based on Biomimetic Curved Compound Eye Camera

ZHU Shuaimin<sup>1</sup>, GUO Wenge<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, ZHANG Yuanjie<sup>2,3</sup>, XU Huangrong<sup>3</sup>,

WU Dengshan<sup>2</sup>, ZHOU Xiaojun<sup>2</sup>, YU Weixing<sup>2,3</sup>

(1 College of Science, Xi'an Shiyong University, Xi'an 710065, China)

(2 Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710072, China)

(3 College of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Using a vision system to locate a target is a necessary step for its three-dimensional detection of the target. The traditional single-aperture imaging system can only obtain the geometric image information of the target. A compound eye vision system has the advantages of large field of view, large depth of field, multi-channel imaging, and can obtain the depth information of the target and be sensitive to fast moving targets. At present, a common visual positioning method is to use the binocular vision system to locate the target based on the parallax between two cameras. However, because the binocular vision system has only one set of constraints, and the baseline is fixed, the binocular vision system has low positioning accuracy in the long distance, while the compound vision system has more constraints because of the number of sub-eyes. In the long distance, the positioning accuracy is higher than the binocular vision system. It has aroused a wide attention of researchers. This paper uses the bionic curved compound eye camera developed in the laboratory to carry out the research of 3D positioning and 3D reconstruction. The compound eye vision system consists of a curved compound eye, an optical relay image conversion subsystem and a high-definition image sensor. In this paper, CAL Tag calibration board and MATLAB stereo calibration toolbox is used to calibrate the internal parameter matrix of the compound eye camera and the rotation matrix and translation vector between the sub-eye and the world coordinate system. Based on the principle of binocular vision positioning, a mathematical model for multi eye positioning is established on a compound eye vision system developed in the laboratory, and positioning experiments are conducted. The experimental system includes a laser rangefinder, black cardboard, and a compound eye vision system. The laser spot is used as a positioning target. Because the shape of the sub-eye is circular, the hough circle transformation algorithm is used to detect the sub-eye of the compound eye system, and the sub-eye number is determined according to the center coordinates and radius of the circle. Because this experiment is carried out under dark conditions, the background gray value is low and the spot gray value is high, so the gray centroid method is used to locate the centroid of the spot and obtain the centroid of the spot taken by different sub-eyes. The three-dimensional coordinates of the centroid of the spot are obtained from the coordinates of the centroid of the spot in the camera pixel coordinate system according to the corresponding relationship between the pixel coordinate system and the world coordinate system. The linear equations of several sub-eyes are combined to form the overdetermined equations and the optimal solution is obtained by the least square method. The distance measurement experiment results show that the distance measurement error of the compound eye camera is less than 2% within a range of at least 4 meters. The experimental results show that the bionic curved compound eye camera prepared in the laboratory could carry out more accurate three-dimensional positioning of objects in space. The error caused by the laser jitter and the size change of the light spot with the distance change on the positioning result is analyzed in detail. In the aspect of target 3D reconstruction, the sift algorithm is used to detect and match the feature points of the target images of different sub-eyes, and the RANSAC algorithm is used to remove the wrong matching points, to obtain the accurate feature point matching of the target captured by different sub-eyes. Then, according to the corresponding relationship between the pixel coordinate system obtained by camera calibration and the world coordinate system, the three-dimensional coordinates of the feature point in the world coordinate system are calculated from the coordinates of the sub-eye pixel coordinate system, and the complete reconstructed point cloud of the target is obtained through point cloud stitching. The 3D reconstruction experiment is carried out by the reconstruction algorithm. The experiment takes the cube covered with

speckles as the reconstruction target. The cube is photographed at about 0.6 meters from the camera, and a relatively complete 3D reconstruction point cloud is obtained. The research results in this paper show that the bionic curved compound eye camera has great development potential and application prospects in the fields of 3D positioning, 3D reconstruction and optical navigation.

**Key words:** Multichannel imaging; Camera calibration; Image processing; 3D positioning; 3D reconstruction

**OCIS Codes:** 110.6880; 150.5670; 100.6890; 150.1488