

文章编号 1004-924X(2024)12-1836-13

田字型四孔径红外仿生复眼的目标定位

陈颖, 罗琳, 金伟其*, 郭宏, 赵思源, 杨建国

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要:为了探索仿生复眼在目标定位领域的应用,以视场部分重叠的“田”字型四孔径红外仿生复眼成像系统为基础,对其空间目标定位的方法进行研究。根据四个子孔径的空间分布关系分析了“田”字型四目立体视觉的成像过程,和各子孔径与世界坐标系之间的转换关系,并推导出四孔径红外仿生复眼的空间目标定位方法,提出了多孔径约束下的逆成像光路定位方法,使用交错法和点向法解算待定位的目标点坐标;通过对现有四孔径红外仿生复眼实验系统的标定,确定了四个孔径的相对位姿,进而进行了四孔径系统及其部分双孔径子系统的空间目标定位实验,结果表明:相似的孔径空间分布下,“田”字型四孔径对 2 720 mm 距离处的目标的目标定位误差为 40 mm,双目定位的误差为 76 mm,四孔径定位相比双目定位的误差减小约一半,能更精确地定位目标。系统在 1 750 mm 处的定位误差不超过 2%,水平方向定位精度高于垂直方向。

关键词:红外仿生复眼;田字型四孔径;目标定位;交错法;点向法

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243212.1836

Target positioning method for Tian-shaped four-aperture infrared biomimetic compound eyes

CHEN Ying, LUO Lin, JIN Weiqi*, GUO Hong, ZHAO Siyuan, YANG Jianguo

(MoE Key Lab of Photoelectronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: jinwq@bit.edu.cn

Abstract: In order to explore the application of bionic compound eyes in the field of target positioning, we have studied the spatial target positioning method of the Tian-shaped four-aperture infrared biomimetic compound eyes imaging system with partially overlapping field of view. Based on the spatial distribution relationship of the four sub apertures, the imaging process of the Tian-shaped four-eye stereo vision was analyzed, and the conversion relationship between each sub aperture and the world coordinate system was derived. We have proposed the spatial target positioning method of the four-aperture infrared biomimetic compound eyes and an inverse imaging optical path positioning method under multiple apertures constraints. The coordinates of the target points to be located were calculated using the interleaving method and the point-direction method; By calibrating the existing four-aperture infrared biomimetic compound eyes experimental system, the relative poses of the four apertures were determined, and then we have con-

收稿日期: 2024-03-22; 修订日期: 2024-04-26.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 61871034); 装备预研航天科工联合基金(No. 6141B07090112); 装备预研兵器工业联合基金(No. 6141B012873)

ducted spatial target positioning experiments on the four-aperture system and some binocular subsystems. The results show that under similar aperture spatial distribution, the positioning error of Tian-shaped four-aperture for targets at a distance of 2 720 mm is 40 mm, and the error of binocular positioning is 76 mm. Compared to binocular positioning, the error of four-aperture is reduced by about twice, which can more accurately locate the target. The positioning error at 1 750 mm does not exceed 2%, and the accuracy of horizontal positioning is higher than vertical direction.

Key words: infrared bionic compound eyes; tian-shaped four-aperture; target positioning; interleaving method; point-direction method

1 引 言

光电成像系统在军事和民用领域具有广泛的应用,但由于单孔径成像系统的成像视场与分辨率的要求往往是相互矛盾的,难以同时提升;此外,单孔径视觉不易实现空间目标定位、快速目标探测与跟踪等,在一些特殊成像条件下难以满足应用要求。同时,自然界中普遍存在类人双目视觉以及类昆虫复眼成像系统,其不仅具有变空间分辨率的视场、紧凑的结构,而且具有快速空间目标定位、跟踪等一系列生物视觉智能功能,可望弥补单孔径成像的不足。故仿生视觉特性及其成像技术成为目前研究的重要方向。

20世纪90年代以来,仿生复眼理论和模式的研究已取得许多重要进展^[1-6]。Floreano等^[7]于2013年研制了超大视场的曲面仿生复眼,视场角达到 $180^{\circ} \times 60^{\circ}$ 。可高速传输图像信息,并能与自适应的光感受器电路相结合,实现自主导航。2014年长春理工大学付跃刚等^[8]研究了仿生龙虾眼的红外波段应用。天津大学张雄等^[9]设计了用于三维测量的复眼结构,有7个子眼,可以完成相对误差在2%左右的近景三维测量。四川大学刘艳等^[10]研制了带滑动导轨及锁定装置9眼复眼成像系统进行三维定位方法研究,目标点三维空间坐标的测量平均相对误差1.3%,定位精度为 2.53×10^{-4} rad。2015年以来北京理工大学裘溯等^[11-13]设计了切角 40° 和 20° 的微端面光纤面板和单一高分辨CMOS成像传感器,获得9孔径复眼成像实验系统,提出利用重叠区域进行超分辨、对运动目标进行快速检测等方法。2016年, Lee等提出了一种计算复合EYE(COMPU-EYE)成像系统^[14],可将成像分辨率提高四倍。2019年,

朱其淘^[15]研制了141个子眼的曲面新型仿生复眼定位装置,重新设计了复眼系统标定方案,标定后的系统定位精度提升约18%。在红外仿生复眼技术方面,2021年,北京理工大学罗琳等^[16]研究了多孔径分布式视场部分重叠仿生热成像理论与技术,采用四个 640×480 pixels的非制冷红外焦平面探测器(Infrared Focal Plane Array, IR-FPA)构成田字型分布式视场部分重叠仿生热成像实验系统,可获得类似人眼中心高分辨率成像,周边大视场搜索的变空间分辨率视觉模式。2022年杨建国等^[17]研究了“十”字型多孔径视场部分重叠仿生热成像方法,采用四个/五个小阵列非制冷IRFPA构成十字形分布式视场部分重叠仿生热成像实验系统,拼接总视场为单孔径相机的2.36倍,成像分辨率得到了改善。

人眼属于典型的双目立体视觉,通过三角交汇测距可感知空间目标的距离。计算机视觉中,双目立体视觉实现空间目标的三维定位,但这种体视效果会随目标距离的增大、基线距离的缩小等因素而减弱,多孔径仿生复眼成像可望具有更佳的空间目标定位能力。本文基于田字型四孔径视场部分重叠仿生热成像模式,研究复眼成像的空间目标定位原理,并结合田字型四孔径仿生复眼热成像实验系统,验证其空间目标定位方法具有更佳的空间定位能力。

2 田字型红外仿生复眼实验系统

利用4组红外物镜及IRFPA机芯组成如图1所示的田字型四孔径视场部分重叠仿生复眼热成像模式。四孔径视轴按照水平和垂直视场具有一定重叠率而倾斜相应角度,相邻子视场之间有约50%的视场重叠(如图1(b)),构成1个4眼

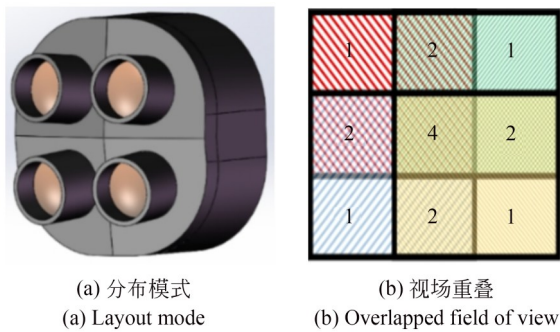


图1 “田”字型四孔径视场部分重叠热成像模式

Fig. 1 Thermal imaging mode with Tian-shaped four-aperture

重叠中心区域、上下左右4个2眼重叠区域和4个单眼区域共9个子区域。

多孔径视场部分重叠的热成像实验系统(如图2所示)由面板、底座组成。四组微位移平台通过连接板件结构固定于面板上。每组微位移平台实现上下、左右方向的移动。四组热成像镜头固定于面板上,可实现前后方向的焦距微调节。四个探测器分别位于四组微位移平台上,分别接收相应的热成像镜头的光学信息。

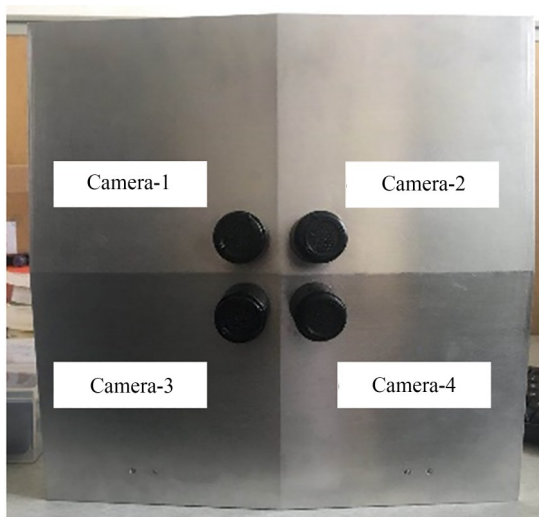


图2 田字型四孔径红外仿生复眼成像实验系统

Fig. 2 Tian-shaped four-aperture infrared biomimetic compound eye imaging experimental system

面板分为四个子区域,子区域均不垂直于水平面。理论上,每个子区域的法向量平行于该区域孔径的光轴。为了使各子孔径的视场之间有约50%的视场重叠率,设计对角两个子孔径的光轴夹角为 14° ,相邻两个子孔径的光轴夹角约为

9.89° 。单孔径视场为 $32^\circ \times 24^\circ$,根据孔径倾斜关系,四孔径系统总视场约 $41.89^\circ \times 33.89^\circ$;水平相邻的两个子孔径的重叠视场为 $22.11^\circ \times 24^\circ$;竖直相邻的两个子孔径的重叠视场为 $32^\circ \times 14.11^\circ$;中心四个孔径均重叠的视场为 $22.11^\circ \times 14.11^\circ$ 。

3 红外仿生复眼的目标定位理论

为了建立田字型四孔径仿生复眼热成像模型,不失一般性,建立如图3所示的四孔径倾斜关系。理想情况下,四个相机的光轴倾斜交于一点,即上方两个相机的光轴水平夹角为 2β ,相距 $2w$,下方两个相机的夹角也为 2β ,相距 $2w$ 。纵向左边两个相机光轴的竖直夹角为 2α ,相距 $2h$,右边两个相机的夹角也为 2α ,相距 $2h$ 。

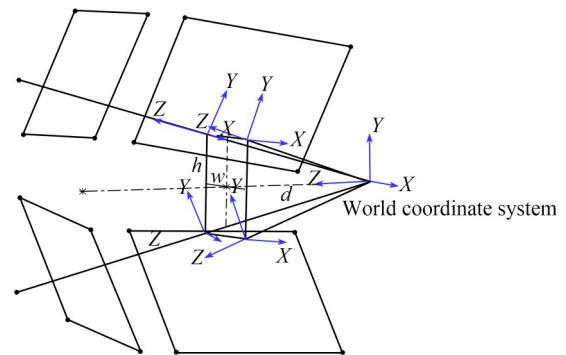


图3 四孔径系统子孔径倾斜关系

Fig. 3 Tilt relationship between sub apertures

以光轴的交点为原点建立世界坐标系。四个相机的光心共面,构成一个矩形。将该矩形的中心和光轴交点的连线作为 z 轴,从交点指向矩形中心为正方向。 x 轴平行于横向两个相机的光心连线, y 轴平行于纵向两个相机的光心连线。原点到四个光心构成的矩形所在平面的距离为 d 。在如此假设下,四个相机坐标系相对于世界坐标系的变换是对称的。

恢复目标的三维信息所进行的逆透视变换如果只能在两台相机之间进行,得到的结果总是唯一的。这种唯一结果并不表示测量精度很高,因为标定过程中包含一些随机因素的影响。为此,采用多台相机同时进行拍摄(且合成多目视觉)可以消除或减少随机因素的影响,从而提高测量的精度。

3.1 相机成像模型中的四种坐标系及其变换关系

相机将采集的图像保存为矩阵形式的数字图像,数字图像以像素作为单位,每个像素中保存相机采集到的信息,如亮度/灰度、颜色、偏振等,每一幅数字图像中定义了像素坐标系 O_v-uv 及图像坐标系 $o-xy$,如图 4 所示。

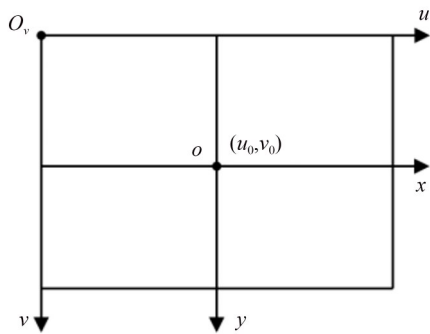


图 4 像素坐标系与图像坐标系
Fig. 4 Pixel and image coordinate system

像素坐标系 O_v-uv 中的每一个像素的坐标 (u, v) 代表像素的位置,以像素数作为单位。图像坐标系 $o-xy$ 的坐标原点位于相机光心的像素坐标 (u_0, v_0) ,图像坐标系以探测器光敏面像素大小的物理长度作为单位。每个像素在图像坐标系中的物理尺寸分别为 (dx, dy) 。像素坐标系和图像坐标系之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -u_0 dx \\ 0 & dy & -v_0 dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

相机的成像关系如图 5 所示。一般来说,以相机光心为相机坐标系的原点,相机坐标系 Z 轴通常与光轴重合, X 轴和 Y 轴平行于图像传感器的行和列。图 5 中,图像平面就是图像坐标系。 C 点为相机的光心位置, X_c 与 Y_c 轴分别与图像坐标系的 x 和 y 轴平行, Z_c 轴垂直于图像平面, CO_1 为相机的焦距 f 。由光心 C 与 X_c, Y_c, Z_c 组成的坐标系称为相机坐标系。

空间点 M 与光心 C 连线交图像平面于点 m ,若 m, M 在相机坐标系的坐标分别为 (x, y, z) ,

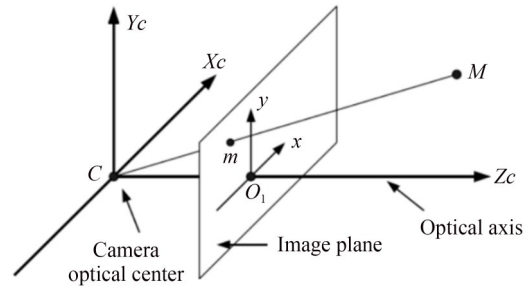


图 5 相机坐标系
Fig. 5 Camera coordinate system

(X_c, Y_c, Z_c) , 已知 $z=f$, 可将相机坐标系与图像坐标系的关系表为:

$$\begin{cases} \frac{x}{X_c} = \frac{y}{Y_c} = \frac{z}{Z_c} \\ z=f \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{f \cdot X_c}{Z_c} \\ y = \frac{f \cdot Y_c}{Z_c} \end{cases}. \quad (3)$$

用齐次坐标和矩阵的形式表示为:

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, s 表示尺度因子, 易知 $s=Z_c$ 。

为描述目标在真实空间中三维坐标, 引入世界坐标系。世界与相机坐标系间的关系可使用旋转矩阵 R 及平移向量 t 变化得到。设空间一点 M 在世界坐标系下的齐次坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$, 在相机坐标系下的坐标为 $(X_c, Y_c, Z_c)^T$, 其间存在关系:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = [R \quad t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中: R 为 3×3 的旋转矩阵, t 为 3×1 的平移向量, P 为相机坐标系与世界坐标系之间的变换矩阵。

综上所述, 式(1)和式(2)可实现像素坐标系和图像坐标系之间的转换, 式(4)和式(5)表示图像坐标系和相机坐标系的转换, 式(6)表示相机坐标系和世界坐标系的转换。因此, 世界坐标系中的一点经相机成像后的像素坐标的转换过

程为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \quad t] [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = s \cdot [R \quad t]^{-1} \cdot K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中: $f_u=f/dx, f_v=f/dy$; R 为旋转矩阵; t 为平移向量; K 矩阵为相机的内部参数。

3.2 四孔径系统各相机坐标系的转换方法

已知一矢量相对某坐标系 A 的描述, 想求其相对另一个坐标系 B 的描述, 此时需要同时用到坐标系之间的平移和旋转变换。如图 6 所示, 坐标系 A 和坐标系 B 原点不同且姿态不同。

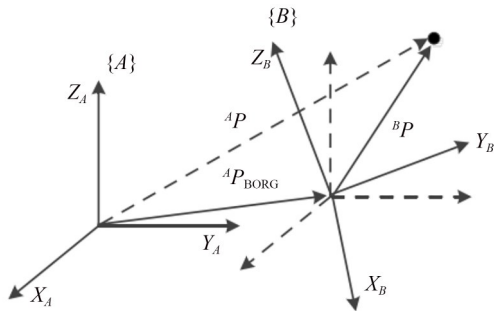


图 6 三维坐标系的旋转与平移
Fig. 6 Rotation and translation of 3d coordinate systems

已知空间中的点 P 相对于坐标系 A 的描述为 ${}^A P$, 那么相对于坐标系 B 的描述可以通过复合变换得到。首先通过平移变换得到一个中间坐标系, 原点与坐标系 B 重合。然后再将中间坐标系进行旋转变换, 使中间坐标系和坐标系 B 的姿态相同, 其与坐标系 B 重合。用 ${}^B_A P$ 表示坐标系 A 变换为坐标系 B 相同姿态的旋转矩阵, ${}^B P_{AORG}$ 表示坐标系 A 原点与坐标系 B 原点的平移矩阵, 则空间点 P 相对于坐标系 A 的描述 ${}^B P$ 可表示为:

$${}^B P = {}^B_A P ({}^A P + {}^B P_{AORG}). \quad (9)$$

空间中一点 P 经四孔径系统成像过程如图 7 所示, 给出了四个孔径的图像平面和相机坐标系。

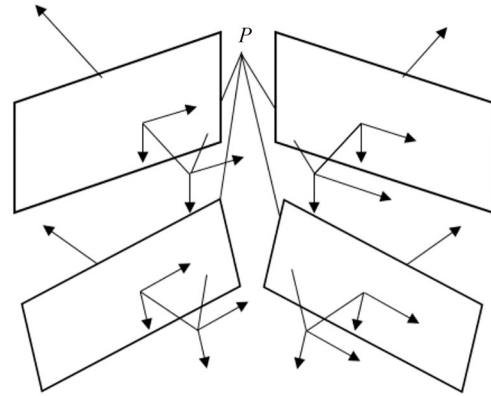


图 7 四孔径复眼系统成像过程
Fig. 7 Imaging process of four-aperture compound eye system

根据 2 中的系统设计参数可知四个孔径的位姿变换关系。以左上相机一为例, 其相机坐标系可由世界坐标系旋转、平移后得到, 具体变换步骤为世界坐标系绕其 x 轴旋转角度 α , 再绕旋转后的新 y 轴旋转 β 角得到相机的姿态, 再分别沿 x, y, z 坐标轴平移对应距离, 角度关系如图 8 所示。

表示绕 x 轴旋转角度 α_i , 再绕旋转后的新 y 轴旋转 β_i 角的旋转矩阵为:

$$R_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & \sin \beta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & \sin \beta_i \\ \sin \alpha_i \sin \beta_i & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \cos \beta_i \\ -\cos \alpha_i \sin \beta_i & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \cos \beta_i \end{bmatrix}. \quad (10)$$

易知, 式 (10) 的逆矩阵表示绕 y 轴旋转角度 $-\beta_i$, 再绕旋转后的新 x 轴旋转角度 $-\alpha_i$ 的旋转矩阵:

$$R_i^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & \sin \alpha_i \sin \beta_i & -\cos \alpha_i \sin \beta_i \\ 0 & \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \\ \sin \beta_i & -\sin \alpha_i \cos \beta_i & \cos \alpha_i \cos \beta_i \end{bmatrix} = R_i^T. \quad (11)$$

沿 x, y, z 轴平移一定距离的平移矩阵可

表为:

$$T_i = [w_i, h_i, d_i]^T. \quad (12)$$

用下标 i 表示四个相机坐标系, X 表示空间

点在世界坐标系下的坐标, X_i 表示对应相机坐标系下的坐标, 根据式(9), X_i 与 X 的关系为:

$$X_i = R_i X + T_i, X = R_i^{-1} (X_i - T_i). \quad (13)$$

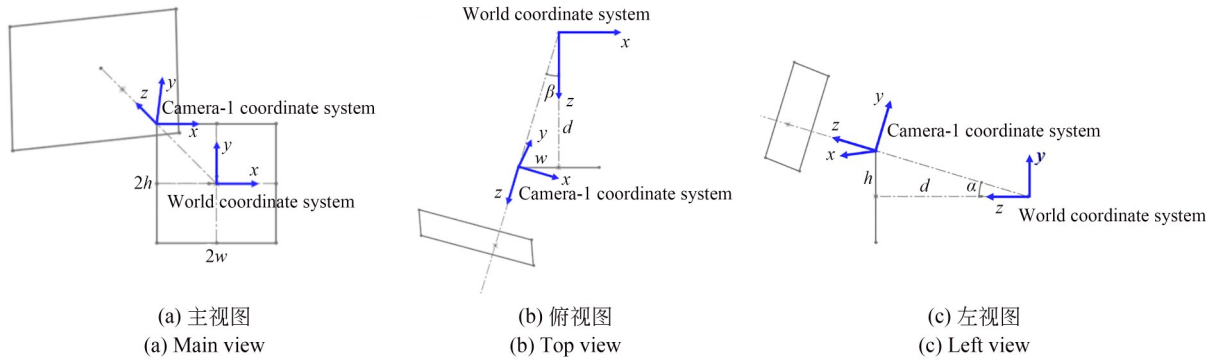


图 8 相机一坐标系与世界坐标系的变换关系三视图

Fig. 8 Three views of the transformation relationship between camera-1 coordinate system and world coordinate system

由于四个相机的位置关系是相互关联的, 可将四个相机坐标系的旋转、平移矩阵用 α, β, w, h, d 表示, 得到统一的表示方法。所有定义采用右手坐标系, 逆时针旋转为正。从世界坐标系转换到各相机坐标系的旋转、平移矩阵如下:

相机一: $\alpha_1 = -\alpha, \beta_1 = -\beta, T_1 = [-w, h, d]^T$

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

相机二: $\alpha_2 = -\alpha, \beta_2 = \beta, T_2 = [w, h, d]^T$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ -\sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

相机三: $\alpha_3 = \alpha, \beta_3 = -\beta, T_3 = [-w, -h, d]^T$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ -\sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

相机四: $\alpha_4 = \alpha, \beta_4 = \beta, T_4 = [w, -h, d]^T$

$$R_4 = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

根据前期的系统理论分析可知, α, β 为 $4.93^\circ, w=h=21 \text{ mm}, d=243.46 \text{ mm}$ 。

3.3 四孔径复眼空间目标定位理论

传统相机的成像过程是从目标发出的光线经过镜头聚焦成像在探测器光敏面上。目标发出的能被相机采集的所有光线都会经过相机光心, 最后与探测器光敏面相交形成图像。由此反向推理, 根据光敏面上目标像和相机光心可确定物空间的目标入射光束。但单孔径成像无法得到目标的距离, 如果想对目标进行测距定位、确定形态等, 需要使用更多孔径。简化目标为一个点, 每个孔径的入射光束变为入射光线, n 个孔径对应 n 条入射光线, 所有入射光线的交点是目标点, 这就是逆成像光路定位法。

当前复眼研究常见的定位方法是将复眼系统分解为多个双目子系统, 每个子系统都可通过双目定位获得一个结果, 将所有结果进行比较挑选或平均、加权平均等处理确定定位结果。我们使用完整的复眼系统多孔径信息进行目标定位, 提高系统的信息利用率。

如图 9 所示, 空间一点被四孔径系统捕获, 对应 4 条入射光线。利用相机光心和光敏面对应的像点确定入射光线。空间两条不平行的直线不一定有交点, 但仍可以找出距离两条直线最近的唯一点。如果有更多条直线, 更难以完全相交于一点。四条入射光线不平行, 会有交汇靠近的区域, 可以认为目标实际所在位置就在该区域中。以逆成像光路法为基本思路, 我们提出交错

法和点向法两个数学方法寻找距 4 条直线都最近的那个点,求解目标点坐标 (x, y, z) 的最优解。

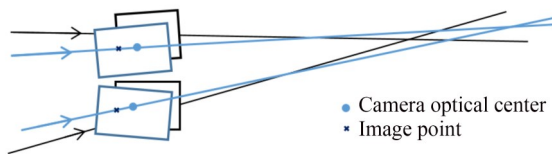


图 9 四孔径系统逆成像光路定位原理

Fig. 9 Principle of inverse imaging optical path positioning

3.3.1 空间目标点坐标求解方法一——交错法

设目标点经四孔径系统成像后像点的世界坐标为 (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}) , $i=1, 2, 3, 4$ 。四个孔径的相机光心世界坐标为 (x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}) 。当一个空间目标点 $\mathbf{X}=(x, y, z)^T$ 被四孔径系统一个子孔径捕获时,利用相机光心坐标和对应图像坐标两点确定入射光线方程:

$$\frac{x - x_{i1}}{x_{i2} - x_{i1}} = \frac{y - y_{i1}}{y_{i2} - y_{i1}} = \frac{z - z_{i1}}{z_{i2} - z_{i1}}. \quad (14)$$

将式(14)等号两端交错相乘并整理成矩阵形式 $A_i \mathbf{X} = B_i$,则:

$$A_i = \begin{bmatrix} y_{i2} - y_{i1} & x_{i1} - x_{i2} & 0 \\ 0 & z_{i2} - z_{i1} & y_{i1} - y_{i2} \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} x_{i1} y_{i2} - x_{i2} y_{i1} \\ y_{i1} z_{i2} - y_{i2} z_{i1} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

空间中一个目标点被多个相机捕获,对应多条入射光线,这些光线的交点即为空间目标点。联立 n 条光线可得到形如 $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$ 的方程组,这是未知数个数 $n=3$ 的 $2n$ 个方程, \mathbf{A} 为 $2n \times 3$ 矩阵。四孔径系统有四条入射光线,得到矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} y_{12} - y_{11} & x_{11} - x_{12} & 0 \\ 0 & z_{12} - z_{11} & y_{11} - y_{12} \\ y_{22} - y_{21} & x_{21} - x_{22} & 0 \\ 0 & z_{22} - z_{21} & y_{21} - y_{22} \\ y_{32} - y_{31} & x_{31} - x_{32} & 0 \\ 0 & z_{32} - z_{31} & y_{31} - y_{32} \\ y_{42} - y_{41} & x_{41} - x_{42} & 0 \\ 0 & z_{42} - z_{41} & y_{41} - y_{42} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_{11} y_{12} - x_{12} y_{11} \\ y_{11} z_{12} - y_{12} z_{11} \\ x_{21} y_{22} - x_{22} y_{21} \\ y_{21} z_{22} - y_{22} z_{21} \\ x_{31} y_{32} - x_{32} y_{31} \\ y_{31} z_{32} - y_{32} z_{31} \\ x_{41} y_{42} - x_{42} y_{41} \\ y_{41} z_{42} - y_{42} z_{41} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

其中:下标第一位表示第几部相机;第二位的1表示相机光心,2表示空间点通过该相机所成的像点; (x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}) 是第 i 部相机光心,可由相机标定和坐标系空间变换得到; (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}) 是目标点经第 i 部相机成像像点,其坐标可由像素坐标转换和坐标系空间变换得到。

\mathbf{A} , \mathbf{B} 由空间点能被捕获的相机数量决定。一个相机时,方程组有2个方程、3个未知数,无法求解;相机数量增加,方程数量必然大于3,方程为超定方程组,解该方程组即可得到目标点坐标。

超定方程没有精确解,但可以通过最小二乘理论解超定方程组求得目标坐标 $\mathbf{X}=(x, y, z)^T$:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}. \quad (17)$$

3.3.2 空间目标点求解方法二——点向法

将4条直线记为 l_i , $i=1, 2, 3, 4$,每条直线上有两个已知点,记作 $p_{i1} = [x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}]$, $p_{i2} = [x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}]$ 。每条直线的方向向量为 $\mathbf{U}_{i1} = p_{i2} - p_{i1} = [u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}]$ 。在空间中确定一条直线只需两个点,每条直线可由直线上一个已知点和它的方向向量定义。因此,4条直线的方程可表为:

$$\frac{x - x_{i1}}{u_{xi}} = \frac{y - y_{i1}}{u_{yi}} = \frac{z - z_{i1}}{u_{zi}} = a_i, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (18)$$

将 x, y, z 及所有 a_i 作为未知数,改为矩阵形式^[18]:

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{d}, \quad (19)$$

其中, $\mathbf{m} = [x, y, z, a_1, a_2, a_3, a_4]^T$, $\mathbf{d} = [x_{11}, y_{11}, z_{11}, x_{21}, y_{21}, z_{21}, x_{31}, y_{31}, z_{31}, x_{41}, y_{41}, z_{41}]^T$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -u_{x1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -u_{y1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -u_{z1} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -u_{y2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -u_{z2} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_{x3} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{y3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -u_{z3} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_{x4} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_{y4} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{z4} \end{bmatrix}$$

G 是维度 12×7 的矩阵, m 前三维 x, y, z 是最邻近点的坐标; 将 a_i 分别代入式(18), 可获得每条直线上相邻最近的点; 向量 d 中放置每条直线上一个已知点。 m 的求解可使用最小二乘技术或者奇异值分解法。

随着空间维度和直线数量的改变, 矩阵 G 的尺寸也会改变。记空间维度为 N , 直线数量为 n , 则 G 的尺寸为 $(n \times N) \times (n + N)$ 。这种变矩阵方法可用于三维空间或 N 维空间的扩展, 在各种几何关系(相交、不相交或平行)中寻找最接近多条直线的向量, 可同时有效地得到每条线上最近点的坐标, 被称为点向法。

在四孔径系统中, 记 4 条入射直线为 $l_i, i=1, 2, 3, 4$ 。每条直线上有两个已知点: 相机光心坐标 $p_{i1} = [x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}]$, 经相机标定和坐标系空间转换可得; 目标点经第 i 部相机成像的像点坐标 $p_{i2} = [x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}]$, 由像素坐标转换和坐标系空间转换得到; 4 条入射光线各自的方向向量为 $[u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}] = p_{i2} - p_{i1}$; 将以上数值代入点向法即可计算得到 4 条入射光线最邻近点坐标 (x, y, z) 。

3.3.3 交错法和点向法的分析与比较

交错法和点向法是根据逆成像光路法所确定的四条入射光线求解空间目标点坐标的数学方法, 其作用是计算多条空间直线的交点/最近邻点坐标。本质都是联立 n 条空间直线方程的变形式构成超定方程组 $AX=B$ 和 $Gm=d$, 以矩阵形式求解未知数。它们的解法也是相似的。可以使用如式(17)所得的最小二乘解, 也可以使用 SVD 分解法求解。数学上其间区别在于转换后的系数矩阵形式和未知数不同。对比式(14)和式(18)可知, 交错法直接将直线点向式方程交错相乘得到 8 个方程, 未知数有 3 个, 即最终结果的

3 个坐标值。点向法将每条直线的参数 a_i 也设为未知数, 一个直线方程通过参数 a_i 转换为三个方程, 可同时求出目标点和每条直线上距离目标点最近点坐标。

对比交错法和点向法的常数项 B 和 d , 交错法的 B 数据经过原始数据的相乘和相减, 使得原始数据的误差可能进一步扩大, 导致最终结果的精度下降; 点向法的 d 直接使用原始数据, 可避免误差增加, 计算精度应更高一些。

4 验证实验与结果

4.1 四孔径系统标定实验

由于四孔径热成像系统实物的实际制造过程中存在装配误差, 需要对实物系统各个孔径进行位姿标定, 确定四个孔径间的位置关系。标定步骤如下:

(1) 使用四孔径热成像系统拍摄棋盘格的标定板, 变换棋盘格姿态拍摄多幅标定图像。过程中需保证棋盘格同时且完整地出现在四个相机的画面中。

(2) 将步骤(1)获得的图像分割, 每个相机使用自己对应的标定图像完成单独标定, 得到各相机的内参。

(3) 使用不同的相机组合完成立体标定, 得到相机间的外参, 即旋转、平移矩阵。

标定过程拍摄了 23 组标定图像, 图 10 给出其中两组图像。每个孔径的单独标定可通过 MatLab 的工具箱 Camera Calibrator 完成; 不同孔径的相机组合的立体标定通过 Stereo Camera Calibrator 完成。

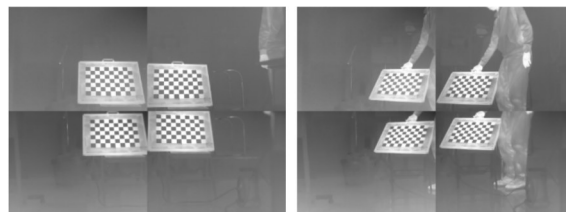


图 10 四孔径系统拍摄的标定图像

Fig. 10 Calibration images captured by four-aperture system

用两个相机的光轴夹角和基线距离来描述其间的位姿关系。基线距离是两个相机光心连线的距离。双目立体标定可得相机间的旋转平

移矩阵,以此计算两相机的空间位置关系如表 1 所示。

表 1 四孔径系统各孔径位置关系计算结果

Tab. 1 Calculation results of the position relationship of each aperture in four-aperture system

	位置关系	光轴夹角/(°)	基线距离/mm
相机 1-2	水平相邻	13.72	42.88
相机 1-3	竖直相邻	11.90	42.76
相机 1-4	对角	15.64	61.61
相机 2-3	对角	16.15	61.75
相机 2-4	竖直相邻	12.14	44.61
相机 3-4	水平相邻	7.82	43.73

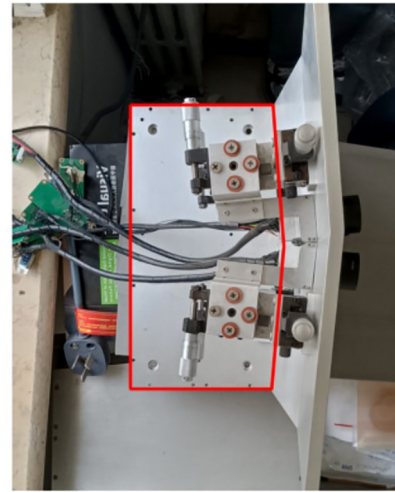
理论上我们设计的对角两个相机的光轴夹角为 14° , 水平、竖直相邻相机的光轴夹角均为 9.89° , 实际测算结果与理论有一定误差。由于制造工艺误差以及镜头和 IRFPA 安装连接在面板上, 光轴可能也不垂直于所处的面板子区域等等, 这些误差使得实际相机光轴倾斜角度发生变化, 甚至可能使其中某两个光轴不共面, 导致无法计算光轴夹角。此情况下的光轴夹角是使用两个光轴的方向向量计算得出的。

4.2 四孔径系统小球定位实验

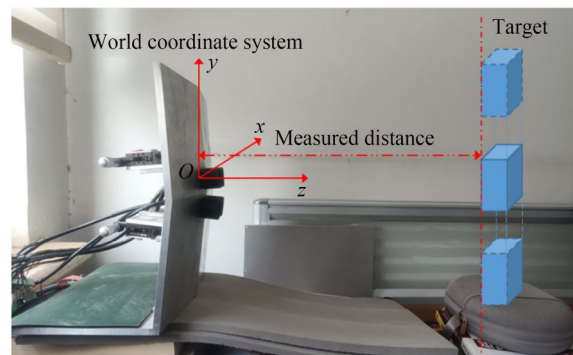
如图 11(a) 所示, 四孔径系统底座是一个五边形, 其中两条短边等长且互相平行, 并垂直于长底边, 两条斜边等长。本文中的所有测量都按照以下规定完成: 从左上孔径相机 1 与面板连接处最左侧点起, 取水平且垂直于四孔径系统长底边指向系统前方为测量方向, 测量该方向上目标到系统的距离。人为建立的世界坐标系以从左上孔径相机 1 与面板连接处最左侧点为原点, x 轴平行于底座长底边, y 轴为垂直方向, z 轴水平且垂直于底座长底边, 指向系统前方为正方向。

为验证使用四孔径系统定位空间目标的可行性, 并且验证逆成像光路最近邻点定位法, 使用四孔径系统采集包含已知距离的目标物的图像, 对视场重叠区域的目标点使用基于逆成像光路法的交错法和点向法求解计算实际空间位置坐标。这里给出示例实验图像如图 12 所示, 白色小球是目标物, 小球距离四孔径系统的实际距离为 2 720 mm, 小球的直径为 15 mm。

目标经四孔径系统成像, 根据逆成像光路可



(a) 系统底座
(a) Base of the system



(b) 实验中的世界坐标系
(b) World coordinate system in the experiment

图 11 距离测量示意图

Fig. 11 Schematic diagram of distance measurement



图 12 空间目标定位实验图像

Fig. 12 Experimental image of spatial target positioning

知,通过相机光心和像点的四条入射光线会在空间某区域交会,目标点的近似坐标是距离四条直线都最近点坐标(如图 13 所示)。 x 和 y 轴分别表示水平和垂直距离; z 轴表示深度,即目标点距离四孔径系统的距离。

目标同时出现在四个孔径视场中,可使用不同的相机组合进行定位,即将四孔径系统分为多个孔径分布相似的双目子系统。表 2 给出部分相机组合分别使用基于逆成像光路的交错法和点向法计算的定位结果(单位 mm),并与实际距离 2 720 mm 的比较。

表 2 中的误差是计算结果与实际距离的差的绝对值。可以看出,交错法和点向法都可定位空

表 2 2 720 mm 处的目标定位结果及误差

Tab. 2 Positioning results and errors at 2 720 mm(mm)

相机组合	交错法	误差	点向法	误差
1-2	297.3	2 422.7	2 347.2	372.8
1-3	2 166.1	553.9	2 036.1	683.9
1-4	2 824.7	104.7	2 796.3	76.3
1-2-3	2 354.9	365.1	2 515.4	204.6
1-2-3-4	2 616.9	103.1	2 759.7	39.7

间目标,计算出目标坐标,四孔径系统空间目标定位方法有效;相机数量及其间的分布方式对定位精度有明显影响。

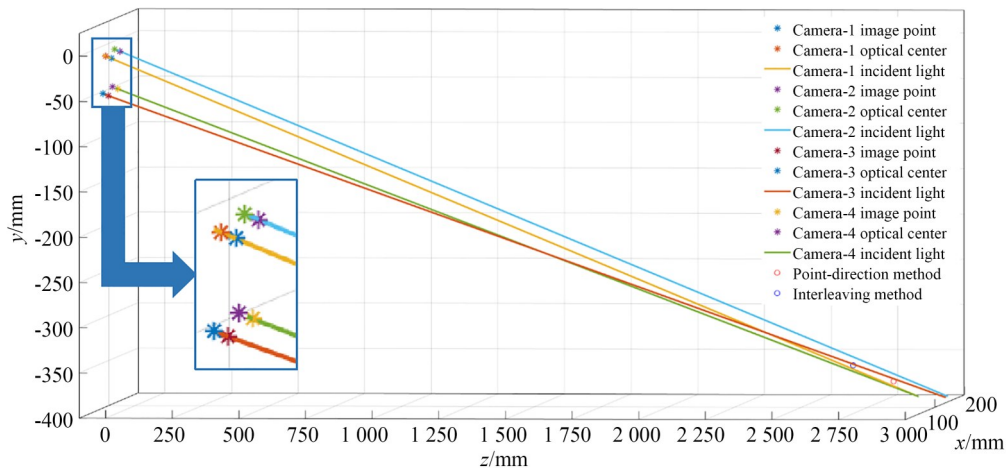


图 13 四目定位算法原理

Fig. 13 Principle of four-aperture positioning algorithm

四孔径系统不仅可实现四目定位,也可仅使用其中任意两个孔径的信息完成双目定位。在四孔径系统构成的部分双目定位组合中,对角分布的相机 1-4 协同定位最为准确(基线距离约 61.61 mm),定位误差为 76.3 mm,相对误差约 2.81%;竖直和水平相邻的相机 1-3 和相机 1-2(基线距离约 42 mm)定位误差分别为 683.9 mm 和 372.8 mm,相对误差分别为 25.1% 和 13.7%,明显劣于相机 1-4 组合;所有相机组合中定位最准确的是四目定位,定位误差约 39.7 mm,相对误差 1.46%,比最好的双目定位误差减小约一半。由于四目定位综合了不同空间分布和基线距离的双目定位的信息,将可能出现的误差最小化,从而获得更准确的

结果。

交错法和点向法两种求解多条直线最近邻点的数学方法中,同样的相机组合,交错法的结果误差更大,且可能出现与真实情况有极大偏差的异常情况,如相机 1-2 的定位结果 297.3 mm。点向法的最佳计算结果为 2 759.7 mm,比交错法最佳结果 2 616.9 mm 更接近真实值,相对误差减小了 5.25%。

定位误差主要来源于四个相机的内外参标定误差,利用 MatLab 的立体相机标定功能只能同时标定两部相机,无法同时确定四个相机的位置关系。有更好的相机标定结果将可获得更精准的定位结果。另外,误差还可能由目标点像素坐标的提取引起。

4.3 四孔径系统九圆孔定位实验

成像系统将三维场景投影为二维图像,根据相机针孔模型,实际场景中目标在 x 和 y 方向的位移与图像上目标在 x 和 y 方向的位移是成比例的,知道相机焦距即可直接从成像系统的二维投影图像获取目标在实际场景中 x 和 y 方向的信息,实现水平和垂直方向的目标定位。当确定距离 z 信息时,已得到目标的全部三维信息,也就获知了目标的实际空间位置。我们进行了 1 750 mm 处的定位实验,在验证四孔径系统定位能力的同时也比较其在各个方向上的定位精度。

实验采用有九个镂空圆孔的目标板,每个圆的直径均为 30 mm,相邻两个圆的圆心距离水平方向 75 mm,竖直方向 50 mm。将九圆孔实验板放置在有一定温度的背板上,板上九个圆形清晰可见(如图 14 所示)。圆孔板垂直于地面立起,与四孔径系统的距离为 1 750 mm。

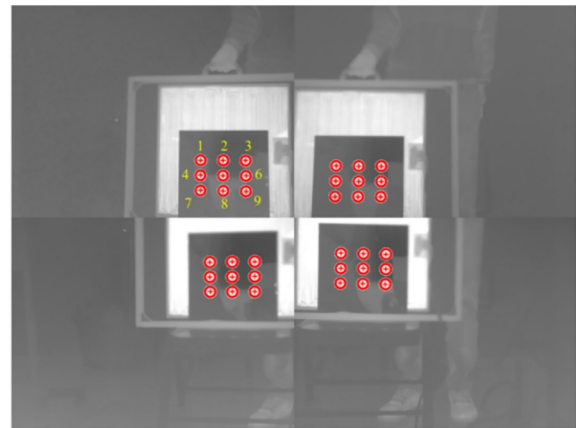


图 14 九圆孔板定位实验图像

Fig. 14 Experimental images of 9 circular holes positioning

在图像上提取每个圆心的像素坐标,进而计算它们与四孔径系统的距离及相互间的位置差,与实际情况进行比较。从第一行左边第一个圆开始,给九个圆编号。使用点向法四目定位计算每个圆心的三维坐标,结果见表 3。

表 3 九孔定位结果

Tab. 3 Positioning results of 9 circular holes

圆孔编号	x/mm	y/mm	z/mm	距离误差/ mm	相对误差
1	118.6	277.5	1 745.1	4.9	0.28%
2	194.0	277.4	1 740.0	10.0	0.57%
3	268.2	275.1	1 719.6	30.4	1.74%
4	119.1	330.0	1 753.2	3.2	0.18%
5	193.2	327.2	1 729.5	20.5	1.17%
6	269.7	327.5	1 725.9	24.1	1.38%
7	118.5	381.8	1 751.8	1.8	0.10%
8	196.4	384.8	1 758.4	8.4	0.48%
9	272.2	382.8	1 741.2	8.8	0.50%

对于 x, y, z 三个方向的信息,首先关注距离信息,即 z 分量的值,将计算值和实际值进行比较,取两者之差的绝对值为误差,误差与实际值的百分比为相对误差。根据表 3 中的实验结果可知,田字型四孔径红外复眼系统使用点向法定位 1 750 mm 处的目标效果很好。九孔定位实验中,位于目标板左下方的 7 号圆孔定位结果 1 751.8 mm 与实际距离最接近,相对误差 0.1%。九孔定位实验结果都接近真实距离。每行的圆孔定位误差从左到右逐渐增大;左边第一列 1, 4, 7 号圆孔定位比同一行的其他两列都更准确。第一

行的三个圆孔定位误差分别大于第三列。综合来看在四个孔径的重叠视场内,目标的位置会影响定位精度,从右向左定位精度增加,从上到下定位精度增加,定位较为准确的区域是重叠视场的左下角区域。

点向法可计算出目标的三维坐标,考虑定位算法在 x, y 方向的精度,计算各个圆之间的水平距离 Δx 和竖直距离 Δy ,并与真实值 75 mm, 50 mm 比较,结果如表 4 和表 5 所示。可以看出,田字型四孔径红外复眼系统定位在水平方向的精度优于垂直方向。

表 4 圆孔间水平距离计算结果

Tab. 4 Results of horizontal distance between circular holes

圆孔	水平距离 $\Delta x/\text{mm}$	误差/mm	相对误差
1-2	75.4	0.4	0.53%
2-3	74.2	0.8	1.07%
4-5	74.2	0.8	1.07%
5-6	76.5	1.5	2.00%
7-8	78.0	3.0	4.00%
8-9	75.8	0.8	1.07%

表 5 圆孔间竖直距离计算结果

Tab. 5 Results of vertical distance between circular holes

圆孔	竖直距离 $\Delta y/\text{mm}$	误差/mm	相对误差
1-4	52.5	2.5	5.00%
2-5	49.8	0.2	0.40%
3-6	52.4	2.4	4.80%
4-7	51.8	1.8	3.60%
5-8	57.7	7.7	15.40%
6-9	55.4	5.4	10.80%

5 结 论

本文详细介绍了田字型四孔径视场部分重叠红外仿生复眼成像实验系统的孔径排布设计,建立了四个孔径复眼成像的空间位置模型。鉴于难以用解析式分析,我们采用基于逆成像光路

原理的交错法和点向法对四孔径复眼成像系统进行了数值分析;针对现有四孔径仿生复眼热成像系统进行了标定,并分别确定了对角孔径、水平和竖直相邻相机的光轴夹角和基线距离;通过实验验证了两种方法定位的准确性,点向法优于交错法,四孔径定位优于部分双目子系统的定位效果;在对 2 720 mm 远的目标定位时,点向法四目定位相比于最佳双目定位的相对误差减小约一半;点向法的四孔径最佳定位结果较交错法的相对误差减小了 5.25%。田字型四孔径系统 1 750 mm 处的定位误差不超过 2%;四目定位方法能在水平和垂直方向上计算距离,水平方向定位精度高于垂直方向。

本文建立了田字型四孔径仿生复眼热成像模型,使四个孔径信息在世界坐标系中得到统一的描述,为多孔径仿生热成像理论的进一步发展提供了有力支撑。虽然已经实现了四目定位,然而由于相机标定获得的内参、外参存在误差,导致各孔径的位姿解算不准确;且确定空间目标点经系统采集后的图像点位置的方法也存在误差,使得最终定位结果的精度仍有提升空间。此外,使用多个相机可采集更多的空间、光谱、偏振等信息,扩大了应用领域。多个相机获取的信息互相扩展又互相约束,可以保证结果的准确性。又因为四孔径系统可形成多种不同数量和空间分布方式的多目相机组合进行目标定位,也增强了系统的鲁棒性。

参考文献:

- [1] OGATA S, ISHIDA J, SASANO T. Optical sensor array in an artificial compound eye[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33: 3649-3655.
- [2] SANDERS J S. Design and analysis of apposition compound eye optical sensors[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(1): 222.
- [3] HAMANAKA K, KOSHI H. An artificial compound eye using a microlens array and its application to scale-invariant processing[J]. *Optical Review*, 1996, 3(4): 264-268.
- [4] TANIDA J, KUMAGAI T, YAMADA K, et al. Thin observation module by bound optics (TOM-BO): an optoelectronic image capturing system[C]. *Optics in Computing 2000. Quebec City, Canada*. SPIE, 2000: 1030-1036.
- [5] TANIDA J, KUMAGAI T, YAMADA K, et al. Thin observation module by bound optics (TOM-BO): concept and experimental verification[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(11): 1806-1813.
- [6] LAYCOCK L C, HANDEREK V A. Multi-aperture imaging device for airborne platforms[C]. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IV. Florence, Italy*. SPIE, 2007: 83-93.
- [7] FLOREANO D, PERICET-CAMARA R, VIOLETT S, et al. Miniature curved artificial compound eyes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(23): 9267-9272.
- [8] 付跃刚, 张方军, 欧阳名钊, 等. 仿生龙虾眼光学

- 系统的发展及其在红外波段的应用[J]. 红外技术, 2014, 36(11): 857-862.
- FU Y G, ZHANG F J, OUYANG M Z, *et al.* Development of lobster eye optical system and the application in IR[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(11): 857-862. (in Chinese)
- [9] 张雄, 宋乐, 张姗姗, 等. 仿生复眼系统标定及测量方法研究[J]. 光电工程, 2014, 41(3): 35-42.
- ZHANG X, SONG L, ZHANG S S, *et al.* The method for the calibration and measurement of bionic compound-eye system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(3): 35-42. (in Chinese)
- [10] 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.
- LIU Y, GOU J, YIN S Y, *et al.* Design of three-dimensional orientation system based on artificial compound eye imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(5): 89-94. (in Chinese)
- [11] 裘溯, 倪宇, 金伟其, 等. 基于微端面光纤面板的多孔径视场重叠复眼的视场模型[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3018.
- QIU S, NI Y, JIN W Q, *et al.* FOV modeling of multi-aperture superposition compound eye based on micro-surface fiber faceplate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3018. (in Chinese)
- [12] 杜仙. 多孔径部分重叠仿生复眼成像系统的结构设计和目标的三维定位[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- DU X. *Construction of Multi-Aperture Overlapping Bionic Compound Eyes Imaging System and its Application in Target Positioning*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] 杨超, 裘溯, 金伟其, 等. 基于多微面光纤面板的仿生复眼图像拼接及定位算法[J]. 兵工学报, 2018, 39(6): 1144-1150.
- YANG C, QIU S, JIN W Q, *et al.* Image mosaic and positioning algorithms of bionic compound eye based on fiber faceplate[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(6): 1144-1150. (in Chinese)
- [14] LEE W B, JANG H, PARK S, *et al.* COMPUTE-EYE: a high resolution computational compound eye[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2013-2026.
- [15] 朱其洵. 仿生复眼精确目标定位算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- ZHU Q T. *Research on Accurate Target Localization Algorithm for Bionic Compound Eyes*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [16] 罗琳, 杨建国, 裘溯, 等. 多孔径分布式视场部分重叠仿生热成像理论与技术[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 3788/IRLA20210062.
- LUO L, YANG J G, QIU S, *et al.* Theory and technology of bionic thermal imaging with multi-aperture distributed and partially overlapped field of view[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 3788/IRLA20210062. (in Chinese)
- [17] 杨建国, 罗琳, 金伟其, 等. “十”字型四孔径视场部分重叠仿生热成像[J]. 光学精密工程, 2022, 30(9): 1019-1028.
- YANG J G, LUO L, JIN W Q, *et al.* Bionic thermal imaging with cross-shaped four-aperture partially overlapped field of view[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(9): 1019-1028. (in Chinese)
- [18] HAN L J, BANCROFT J. Nearest approaches to multiple lines in n-dimensional space[J]. *Crewes Res. Rep.*, 2010, 22: 1-7.

作者简介:



陈颖(1999—),女,云南昆明人,硕士研究生,2021年于北京理工大学获得学士学位,主要从事红外夜视、仿生复眼和光电图像处理方面的研究。E-mail: 3120210526@bit.edu.cn

通讯作者:



金伟其(1961—),男,上海人,教授,博士生导师,1982年于北京工业学院获得工学学士学位,1990年于北京理工大学获得工学博士学位,主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器方面的研究。E-mail: jin-wq@bit.edu.cn