

基于虚拟双球面的仿生复眼系统标定

何建争¹, 简慧杰¹, 马孟超², 王克逸¹

¹中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027;

²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 为了实现对空间目标的探测定位,对设计的仿生复眼系统的标定进行研究。介绍了复眼装置结构,根据复眼成像特点设计搭建了可以构建全视场靶标的标定平台,提出一种基于双球面虚拟靶标的标定方法。建立了复眼标定和定位过程中可以统一众多子眼坐标系的数学模型,详细描述了多通道同时标定或定位的具体步骤,其中包括系统的合理调节、靶点分布均匀性优化以及非线性映射方法选取等过程,同时通过计算机控制可以实现标定过程的自动化运行。在两个球面位置上建立了各子眼通道图像光斑点坐标和靶点角度之间的非线性映射关系。针对提出的标定方法进行了验证实验。实验结果显示,标定后的复眼系统在 60°视场内目标定位相对误差优于 0.5%,定位角度均方根误差为 1.96 mrad。提出的方法能够满足设计复眼的标定要求,且标定后的复眼能够很好地完成对空间目标的测量。

关键词 光学设计; 仿生复眼; 目标定位; 标定; 多通道; 大视场; 虚拟靶标

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0722001

Calibration of Artificial Compound Eye System Based on Virtual Double Spherical Surfaces

He Jianzheng¹, Jian Huijie¹, Ma Mengchao², Wang Keyi¹

¹*Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China;*

²*School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China*

Abstract In order to achieve detection and positioning of spatial objects, calibration of the designed artificial compound eye system is studied. The structure of the compound eye device is introduced. A calibration platform is designed and built based on the imaging characteristics of the compound eye, which can construct the full-field-of-view calibration target. A calibration method based on virtual targets of two spherical surfaces is proposed. A mathematical model is established to unify various sub-eye coordinate systems in the process of compound eye calibration and positioning. The specific steps of simultaneous multi-channel calibration or localization are described, in detail including the reasonable adjustment of system, the uniformity optimization of target distribution and the selection of the nonlinear mapping method and so on. Automatic operation of the calibration process can be achieved by computer control. Then, the nonlinear mapping relationship between the coordinates of the image spots and the target angle is established at two spherical surface positions. Finally, a verification experiment is carried out for the proposed calibration method. The experimental results show that the relative error of the target positioning is lower than 0.5% in the field of view of 60° after calibration of the compound eye system, and the root mean square error of the positioning angle is 1.96 mrad. The proposed method can satisfy the calibration requirements of the designed compound eye, and the calibrated compound eye can achieve measurement of the space object well.

Key words optical design; artificial compound eye; target positioning; calibration; multi-channels; large field of

收稿日期: 2017-01-09; **收到修改稿日期:** 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61275011,51405126)

作者简介: 何建争(1991—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: jzhe@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 王克逸(1962—),男,博士,教授,主要从事近场光学和微光学方面的研究。

E-mail: kywang@ustc.edu.cn (通信联系人)

view; virtual target

OCIS codes 220.4830; 150.1488; 120.1880

1 引 言

自然界中的很多昆虫头部都有由成千上万个子眼组成的复眼视觉器官,其子眼呈曲面密集排布,拥有多通道同时成像的功能和强大的数据处理能力,在远景大视场条件下可以实现空间运动目标的高灵敏度探测定位和图像超分辨重构等功能,在工业、安防和军事等领域都具有潜在的重要应用价值,受到了越来越多的关注^[1-2]。

本课题组在昆虫复眼的基础上设计了一种新型仿生球面复眼结构,该结构具有结构紧凑、重量小、功耗低等优点,可用于空间目标探测、定位和面形测量等。复眼系统成像过程不可避免地存在畸变现象,因此在开展测量工作前需对其进行标定。在机器视觉应用中,相机标定的目的是确定空间点的三维位置与其在图像中对应点坐标之间的相互关系。目前常见的相机标定方法有 Tsai^[3]提出的一种基于径向排列约束的两步标定方法,2000年张正友^[4]提出的基于二维平面标靶的标定方法,Chen等^[5]提出的基于双平面的标定方法和相机自标定方法^[6]等。这些方法大多使用由相机内外参数构成的成像模型和畸变模型来描述成像过程。而在设计的复眼系统中,子眼数目众多,越靠近球壳边缘子眼通道的畸变越大且越复杂,如果分别对每个子眼进行标定,将面临模型难以构造、子眼众多、坐标系难以统一和标定工作量大等问题;如果在复眼大视场内使用平面靶标的方法进行标定,需要的大尺度靶标不仅价格昂贵而且靶标精度难以保证。因此需要一种能够适合此系统的标定方法,该方法需要解决如何建立图像光斑与入射光线矢量之间的关系,如何在同一坐标系中统一子眼的坐标,如何降低对众多子眼进行标定的繁琐度等问题。

本文在设计复眼系统结构的基础上,探讨了复眼标定方法,提出一种基于虚拟双球面靶标的标定方法,设计搭建了一套基于单 LED、高精度二维转台和一维平移台等设备的标定平台。该标定平台利用单 LED 发光点结合二维转台的转动能得到覆盖全视场的高精度靶标,通过计算机控制可以实现自动化标定。详细探讨了复眼系统标定和定位过程的基本原理与实现步骤,建立了每个子眼通道图像光斑与入射光线矢量之间的关系。最后进行了验证实验,评估了系统三维定位误差,并开展了测量工作。

2 复眼系统及畸变分析

2.1 复眼系统

如图 1 所示,所设计的仿生复眼系统有子眼透镜、半球形支撑壳、弯月透镜和互补金属氧化物半导体 (CMOS) 相机等部分组成。复眼共有 141 个子眼通道,子眼在半球面上采用正二十面体细分形式排布(图 2),以提高子眼排布的均匀性;为提高光斑聚焦特性,子眼采用对数型锥透镜,每个锥透镜直径 6 mm,焦深 8 mm,每个子眼通道视场约为 20° ;采用弯月透镜的目的在于优化光路,使光线更加垂直地照射到传感器上;所有子眼通道共用一个 CMOS 相机,图像传感器分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,像元大小为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$;复眼总体视场为 $100^\circ \times 100^\circ$,复眼装置尺寸大小约为 $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ^[7-8],如图 2 所示。

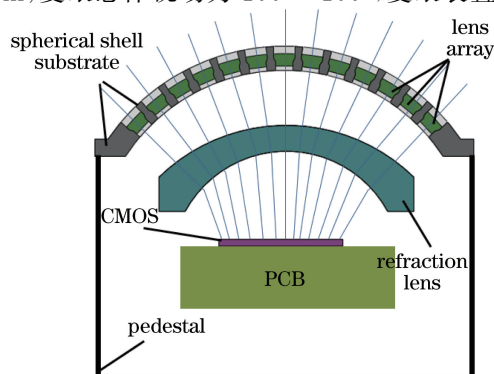


图 1 仿生复眼系统

Fig. 1 Artificial compound eye system



图 2 复眼系统子眼通道

Fig. 2 Serial number of sub-eye channel in compound eye system

复眼系统工作时,空间目标点同时被复眼多子眼捕获,入射光线经过弯月折转透镜成像在 CMOS 上,获得的目标图像通过 USB 接口传输到计算机中作进一步处理。

2.2 系统成像畸变分析

为考察复眼不同子眼通道的畸变情况,在复眼前约 500 mm 处放置一个充满二维圆形靶标阵列的屏幕,分别对 1,3,33,79,135 号子眼进行考察,结果如图 3 所示。从图中可以看出,各通道的畸变情况较为严重,这些畸变不仅与偏离光轴的程度有关,还与子眼透镜在复眼球壳上分布的位置有关,越偏离光轴畸变越严重,越靠近边缘位置的子眼通道畸变越严重,对称性变差。因此为了使复眼适用于高精度目标探测,需要对每个子眼通道进行标定以建立物像的非线性对应关系。

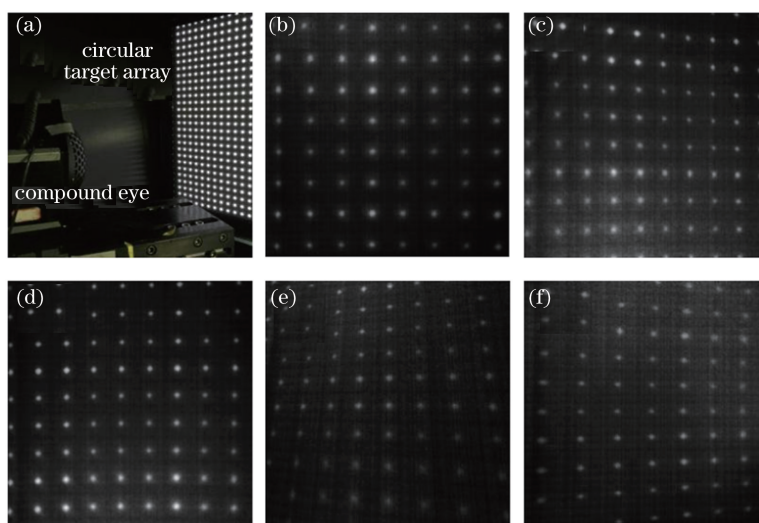


图 3 不同通道实际测量畸变图。(a)采集系统;(b)通道 1;(c)通道 3;(d)通道 33;(e)通道 79;(f)通道 135

Fig. 3 Actual measured distortion images of different channels. (a) Acquisition system; (b) channel 1; (c) channel 3; (d) channel 33; (e) channel 79; (f) channel 135

3 标定装置系统设计

设计搭建的标定平台如图 4 所示,由单个 LED、二维转台和一维平移台等组成。转台采用日本 CKD 公司 AX2012G 型号的伺服电机和对应的驱动器,可实现高精度角度定位。记转台下电机回转轴为竖轴,上电机回转轴为横轴。复眼相机固定于上电机回转轴末端,跟随上下电机转动。LED 安放于一维平移台的支撑

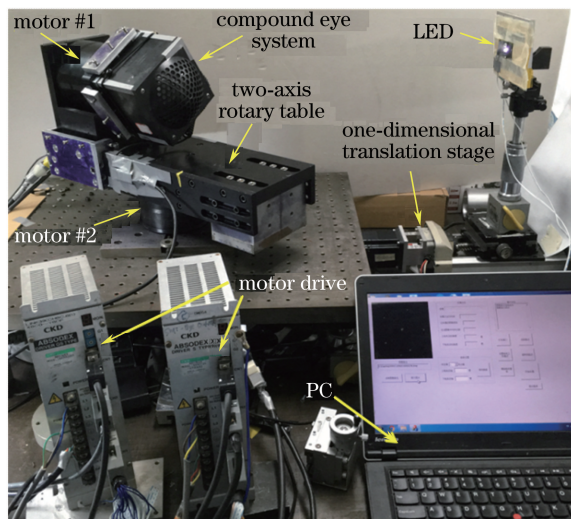


图 4 复眼标定平台

Fig. 4 Calibration platform of the compound eye

架上,平移台移动方向与转台初始位置时的横轴方向平行。转台转动和平移台移动由计算机进行控制。

4 复眼系统标定

4.1 标定与定位原理

建立如图 5 所示的复眼坐标系 $oxyz$,坐标系原点位于横轴与竖轴交点, y 轴与竖轴重合,正方向为远离下电机的方向, z 轴与横轴重合,正方向为远离上电机的方向,在右手坐标系下 x 轴方向如图 5 所示。转台两轴转动时,坐标系跟随转动。将两轴的转动转换为 LED 的旋转,以复眼坐标系为参考坐标系,可以看成转台是静止的,而 LED 在空间中围绕坐标系原点旋转,于是在空间中可以得到一系列虚拟靶点。利用这套装置可以构建覆盖复眼全视场的靶标,同时高精度伺服电机使靶标精度得到保证,从而无需使用大尺寸实物靶标。

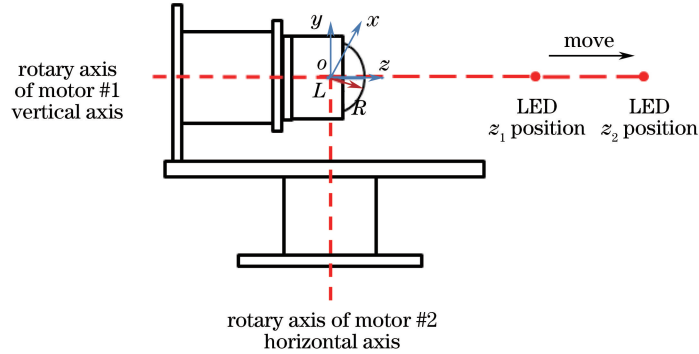


图 5 复眼标定示意图

Fig. 5 Schematic of compound eye calibration

在坐标系中 LED 的坐标变换遵循欧氏变换法则,一般情况下,变换包括围绕三轴的旋转和三轴方向的平移,而在该系统中,得到的变换关系 R 为

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta & \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

则由变换关系 R 可得 LED 在坐标系中的位置关系为

$$\begin{cases} x = L \times \sin \alpha \times \cos \beta \\ y = L \times \sin \alpha \times \sin \beta \\ z = L \times \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

(1)式中变换关系 R 只包括两维的转动:横轴和竖轴相对于初始角度位置分别旋转 α 角和 β 角。在坐标系中,横轴和竖轴转动的正方向为从所在坐标轴向原点看的顺时针方向。

如图 6 所示,假设 LED 初始位置坐落于 z 轴,与两轴交点的距离为 L ,则由变换关系 R [(1)式]可得 LED 在坐标系中的位置关系[(2)式],可知 LED 在空间形成的一系列虚拟靶点呈球面分布,在已知转台两轴转动角度(α, β)的情况下,LED 的位置 $M(x, y, z)$ 很容易获取。为方便表示复眼探测的视场范围,在图 6 所示坐标系下,采用目标点在 xoz 平面和 yoz 平面与 z 轴的夹角 θ 和 φ 来表示视场范围。角度 α, β 和 θ, φ 之间的转换关系为

$$\begin{cases} \theta = \arctan(\tan \alpha \cdot \cos \beta) \\ \varphi = \arctan(\tan \alpha \cdot \sin \beta) \end{cases} \quad (3)$$

当 LED 处于位置 z_1 时,在设定的一系列角度位置上,采集 LED 成像在 CMOS 上的光斑图像,计算图像光斑中心点坐标,将光斑匹配到对应子眼通道,建立每个子眼在 z_1 位置时靶点角度(θ, φ)光与斑点坐标 $P(u, v)$ 之间的对应关系($\theta_{11}, \varphi_{11}, P_{11}$), ($\theta_{12}, \varphi_{12}, P_{12}$), \dots , ($\theta_{1n}, \varphi_{1n}, P_{1n}$);当 LED 在另一个位置 z_2 时,同样可以建立角度与坐标关系($\theta_{21}, \varphi_{21}, P_{21}$), ($\theta_{22}, \varphi_{22}, P_{22}$), \dots , ($\theta_{2n}, \varphi_{2n}, P_{2n}$)。

当空间一个目标点被复眼的一个子眼通道捕获时,在已建立的角度-坐标映射关系基础上,使用插值的

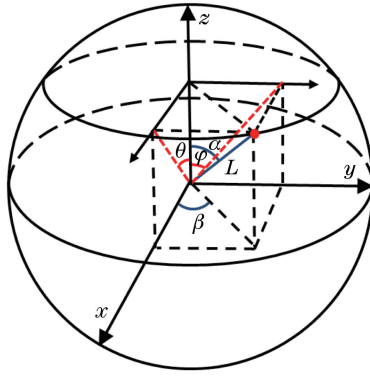


图 6 LED 在坐标系中的位置

Fig. 6 Position of the LED in the coordinate system

方法可以分别得到光斑点在 z_1 和 z_2 两个位置上对应的角度值, 已知角度信息就能在两个标定的球面上分别得到对应点 $M_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $M_2(x_2, y_2, z_2)$, 这两点决定的直线

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}, \quad (4)$$

即为入射光线。

进一步将(4)式转换为空间直线一般式方程的矩阵形式为

$$\mathbf{A}_i \mathbf{X} = \mathbf{D}_i, \quad (5)$$

式中目标点坐标 $\mathbf{X} = [x, y, z]^T$, \mathbf{A}_i 和 \mathbf{D}_i 为空间直线方程的系数, \mathbf{A}_i 为 2×3 矩阵, \mathbf{D}_i 为 2×1 矩阵。

如图 7 所示, 当目标点被多个子眼通道捕获, 会得到多条入射光线, 入射光线都从目标点发出, 因此入射光线的交点即为被测目标点, 联立多条入射光线可得

$$\mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{D}. \quad (6)$$

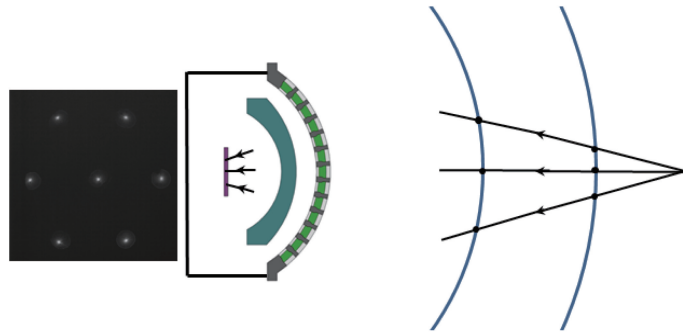


图 7 复眼用于空间目标定位的示意图

Fig. 7 Diagram of compound eye for space target positioning

实际情况下空间目标点一般会被约 8 个子眼通道捕获到, 因此 $4 \leq n \leq 8$ (n 代表光斑点个数)。 (6) 式中 \mathbf{A} 为 $2n \times 3$ 的矩阵, 且 $|\mathbf{A}| \neq 0$, \mathbf{D} 为 $2n \times 1$ 的矩阵, 而需要求解的坐标 \mathbf{X} 参数只有三个, 方程个数多于被求解参数个数, 这是一个超定方程。实际情况下直线不可能完全相交于一点, 通过最小二乘法可以解得空间点三维坐标 (x, y, z) 的最优解。

超定方程的最小二乘解是一种广义解, 是指残差 $\mathbf{V} = \mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X}$ 的 2-范数达到极小值的解, 即 $\|\mathbf{V}\|_2$ 或 $\|\mathbf{V}\|$ 最小, 得到

$$Q = \sum_{i=1}^n \mathbf{V}_i^2 = \mathbf{V}^T \mathbf{V} = (\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X})^T (\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X}). \quad (7)$$

对(7)式求导得

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} [(\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X})^T (\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X})] = 2 \frac{\partial (\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X})^T}{\partial \mathbf{X}} (\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X}) = 2 \frac{\partial (\mathbf{D}^T - \mathbf{X}^T \mathbf{A}^T)}{\partial \mathbf{X}} (\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X}) =$$

$$2 \left[\frac{\partial \mathbf{D}^T}{\partial \mathbf{X}} - \frac{\partial (\mathbf{X}^T \mathbf{A}^T)}{\partial \mathbf{X}} \right] (\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X}) = -2\mathbf{A}^T (\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{X}) = -2\mathbf{A}^T \mathbf{D} + 2\mathbf{A}^T \mathbf{A}\mathbf{X} = 0. \quad (8)$$

当(8)式等于0时, \mathbf{Q} 具有最小值, 此时

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{D}, \quad (9)$$

即为所求目标点。

由上可知, 空间目标点定位过程只需已知光斑与入射光线矢量的映射关系, 而不需要利用具体的相机参数, 因此只需要关联两个位置上光斑点与角度的对应关系即可实现标定。

4.2 标定系统调节

二维转台使复眼围绕横轴和竖轴转动, 目的在于借助 LED 实现精确的虚拟靶标。根据标定原理, 需要将 LED 落在转台初始位置时的横轴线上, 并调节转台使横轴与竖轴相互垂直并相交。两轴的垂直性可以参考经纬仪的调节方法^[9], 使用电子水平仪进行调整。对于两轴的相交性^[10], 借助球壳旋转轴相交于球心的性质, 首先使用非接触式电子千分表调节复眼球壳旋转轴与横轴重合, 再利用同样的调节方法使球壳旋转轴与竖轴重合, 于是可以实现两轴相交于球壳球冠面的球心。系统中 LED 在 z 轴方向的纵向位置可人为设定, 在 xoy 平面上的横向位置需要调节。调节方式为: 在 360° 内等角度间隔转动横轴, 在每个角度位置采集复眼捕获的光斑点图像, 通过通用串行总线(USB)接口将图像传输到计算机中计算光斑中心坐标, 沿导轨方向调整 LED 位置, 在横轴不同角度下, 使子眼通道 1 的成像光斑中心位置重合。

4.3 靶点均匀性设计

在数据插值中, 离散点分布的均匀性特征会影响插值结果精度。在插值过程中, 已知数据分布不均匀, 会导致部分区域数据与邻近点的距离变化较大, 密集度变小, 从而可能使插值获得的数据发生一定程度的失真。

在标定过程中, 如果横轴与竖轴等角度间隔转动, 得到的靶点在虚拟球面会存在两极稠密、靠近赤道区域稀疏的状况。要解决点在球面上的均匀分布问题^[11-12], 目前主要采用的方法有球面上的同性电荷能量最低时的分布、球面等面积划分和正多面体细分等方法。前两种方法通常依靠数学论证和物理模拟, 求解通常比较困难, 具有计算量大、维度高等特点。而基于正多面体细分的方法过程简便, 稳健性强, 而在 5 种正多面体中的正二十面体最接近球形, 因此采用正二十面体作为细分对象来获取均匀靶点。对正二十面体的二十个等边三角形每条边进行 f 等分(f 称为细分频率), 并引入变形系数和约束条件来改善各点之间的均匀性, 将这些细分点和正二十面体顶点向外接球面上投影, 连接球面对应点得到仍由三角形组成的多面体, 多面体的顶点向合适球面位置反向投影就可以得到需要的靶点^[13]。图 8 为外接球为单位球的正二十面体每条边进行频率为 4 的细分得到的效果。实际标定中对正二十面体每边 50 等分, 将得到的顶点沿外接圆径向方向投影到虚拟标定球面, 从而获得均匀靶点位置, 利用标定平台构造出设计的靶标。图 9 为子眼通道 1 在此靶标下获得的光斑位置, 可以看出获得的光斑点具有良好的均匀性。

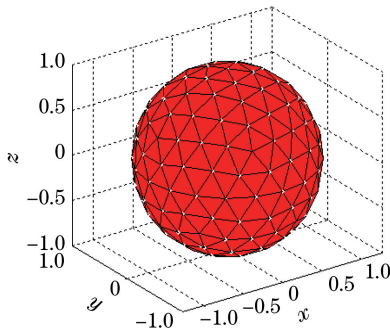


图 8 正二十面体细分($f=4$)

Fig. 8 Subdivision of regular icosahedron ($f=4$)

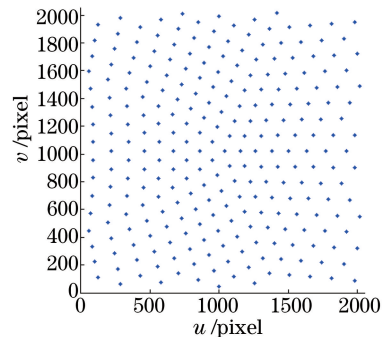


图 9 子眼通道 1 得到的光斑图

Fig. 9 Light spot image obtained by sub-eye channel 1

4.4 非线性映射方法选择

当目标被复眼捕获后, 需要通过图像上光斑点坐标获取对应角度信息, 而实际中得到的光斑点坐标不能完全与已知数据重合, 在建立的光斑点坐标-角度的对应关系基础上, 可以使用合适的映射关系求取未知角度信息, 即 $(\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2) = K[P(u, v)]$ 。常用方法包括三角网插值、克里金(Kriging)插值和神经网络等。

三角网插值法是将已知点数据通过一系列三角形连接成三角网,在三角形内对插值点进行插值计算^[14]。克里金插值又称为空间自协方差最佳插值法,不仅考虑已知点与插值点之间的相对位置,还考虑各已知点之间的相对位置关系,是一种最优内插法^[15]。神经网络由大量神经元组成,可以对系统输入输出进行学习,逼近复杂的输入输出关系^[16]。为比较数据映射效果,使用这三种方法对标定后的子眼通道 1 结果进行数据插值测试。其中在三角网内采用基于三次插补的方式,克里金插值选取样条作为关联模型,神经网络使用包含 10 个隐含层的反向传播(BP)神经网络。

假设理想点位置为 (x, y, z) , 实际得到点为 (x', y', z') , 采用角度误差 $\Delta\gamma$ 来表征插值结果, $\Delta\gamma$ 计算公式为

$$\Delta\gamma = \frac{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (10)$$

从图 10 可以看出子眼通道 1 上三角网插值法虽然在中间区域表现良好,但在边缘点插值会造成较大误差,而且根据其原理,当插值点落在三角网外时得不到合理的插值结果,而克里金和神经网络方法在整体区域表现优异。

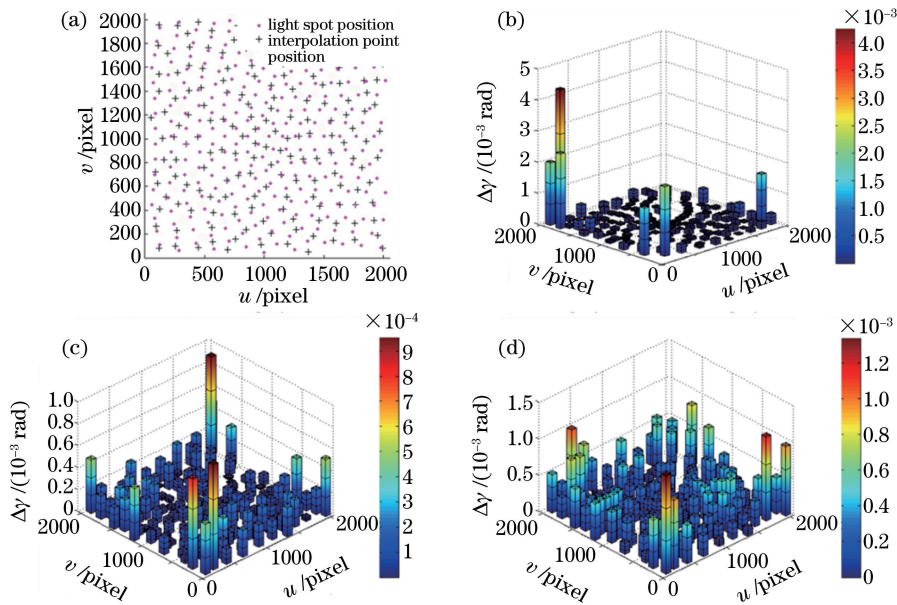


图 10 插值方法比较。(a)测试数据;(b)三角网插值;(c)克里金插值;(d)神经网络

Fig. 10 Comparison of interpolation methods. (a) Test data; (b) triangulation network interpolation; (c) Kriging interpolation; (d) neural network

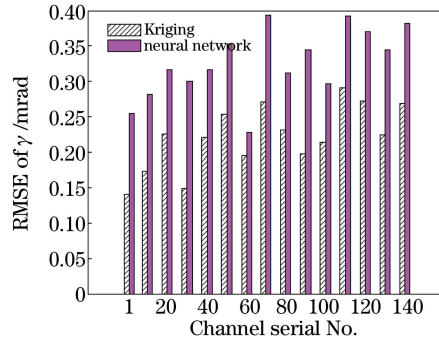
为了进一步比较克里金插值和神经网络这两种方法在各子眼上的表现,抽取部分子眼作为观察对象,所得的 γ 均方根误差(RMSE)如图 11 所示。由图 11 可以得到,克里金插值带来的角度均方根误差更小,说明克里金插值方法在此场合中的表现最优,因此选取克里金插值方法建立光斑点与靶点角度之间的映射关系。

通过比较发现,基于三角网插值的方法只在每个三角范围内插值,不能反映整体的变化趋势,因此造成其在边缘畸变较大处得到的效果较差。BP 神经网络方法利用神经元相互之间的广泛连接形成非线性系统,噪声的影响可能产生的过拟合现象会带来一定的误差。克里金插值方法的结果较好,是因为该方法以空间结构分析为基础进行插值,充分考虑了数据的空间场特性,确定了一个对待估点有影响的距离范围,在这个范围内进行无偏、最优估计。

4.5 标定步骤

复眼系统标定需要建立两个球面分布靶点在坐标系中的角度与对应光斑中心之间的非线性关系,具体标定步骤如下:

- 1) 调节标定系统,包括调节二维转台两轴的垂直性与相交性,合理调节 LED 的安放位置等;
- 2) 驱动转台上下电机转动到设定的角度,形成设定位置的靶点;

图 11 γ 的均方根误差Fig. 11 Root mean square error of γ

- 3) 复眼多通道同时捕获目标,将获得的光斑图像传输到计算机中;
- 4) 对光斑图像进行处理,计算图像中各光斑中心坐标;
- 5) 将光斑与子眼进行匹配,确定每一个光斑所属子眼;
- 6) 存储每个子眼下靶点角度与对应的光斑点坐标;
- 7) 重复步骤 2)~6),使设置的靶点均匀覆盖复眼全视场即可完成在此 LED 位置的标定;
- 8) 移动 LED 至第二个位置,按照步骤 2)~7),完成第二个 LED 位置上的标定,即可完成所有标定过程。

由于在每个 LED 位置设置的靶点数较多,手动驱动电机转动到每一个位置会使标定过程十分繁琐,为了更加简单便捷地完成标定,编写了配套软件,通过软件控制电机驱动器,从而驱动电机转动,标定的每一个流程都可以实现自动控制,从而实现自动化标定。

5 实验与结果分析

为了建立图像光斑与入射光线矢量之间的关系,用图 5 所示方式,驱动一维平移台将 LED 分别置于 z 轴正向 728 mm 和 934 mm 两个位置,完成系统调节后,在这两个位置上分别按设定角度驱动电机转动,使虚拟球形靶标充满整个视场,将得到的图像光斑与子眼通道进行匹配,从而建立每个子眼在这两个位置上光斑坐标和角度的非线性对应关系。在两个位置上设置的靶点均为 4640 个,对于复眼的 141 个子眼通道,建立的非线性关系形如 $(m, \theta, \varphi, P_1, P_2)$,表示子眼通道 m 在角度为 (θ, φ) 的两个球面靶点对应的光斑点坐标分别为 $P_1(u, v)$ 和 $P_2(u, v)$ 。

为检验系统标定效果,对在 z 轴正向 830 mm 处的三维点集[图 12(a)]进行测量验证,被测目标点共 415 个,在复眼 100° 视场内均匀分布。复眼分别捕获目标点得到光斑图像,计算光斑中心坐标,将光斑与子眼通道进行匹配,根据建立的每个子眼通道的光斑-角度的对应关系,使用克里金插值方法得到光斑对应的角度信息,联立多个光斑对应的入射光线直线方程,使用最小二乘法得到目标点位置坐标的最优解。假设目标点理想位置坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,标定后复眼探测得到的目标点位置为 (x'_i, y'_i, z'_i) ,测量误差采用横向方向角误差 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\varphi$ 和总体定位角度误差 $\Delta\psi$ 表征。总体定位角度误差 $\Delta\psi$ 计算公式为

$$\Delta\psi = \frac{\sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2 + (z_i - z'_i)^2}}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \quad (11)$$

图 12(b)~(d)为测量得到的各角度误差,可以看出全视场内获得的横向定位误差($\Delta\theta$ 和 $\Delta\varphi$)较小,总体定位角度误差 $\Delta\psi$ 较大,误差在视场中心区域的表现总体优于视场边缘部分。在后期进行多复眼联合测量时,由于每个复眼只负责一块区域,只会用到部分视场,为此,在视场角 60° 范围内对复眼测量误差进行评估。由表 1 可知,中心视场 60° 范围内复眼探测横向方向角 θ 和 φ 最大误差低于 0.4 mrad,而总体定位角度误差最大达到了 4.9 mrad,可知定位误差主要表现在纵向方向上。由表 1 计算得 60° 视场范围内 830 mm 处的测量误差最大为 4.1 mm,平均误差约为 1.6 mm,定位相对误差优于 0.5%。经过分析,误差主要由以下因素引起:1)转台系统误差和随机误差的存在导致实际靶标位置可能存在偏移,可以对转台的轴系误差和晃动误差进行精确测量,并在标定和定位模型中引入其影响;2)目前而言,呈曲面分布的子眼共用一个平面型的

图像传感器,系统的光学设计还未达到最优化设计,系统存在较大畸变,且经光学仿真软件计算得到的点列图最大直径接近 $200\ \mu\text{m}$ 。实验过程中也发现,每个子眼存在一定的有效视场(图 13),各个子眼采集的图像在有效视场外会出现较程度的光斑点图像模糊、倾斜等问题,是目前系统误差的主要来源;3)非线性映射是一种逼近的思想,靶点的密集程度会对结果产生影响,同时在边缘点数稀疏处插值也会带来一定的误差。

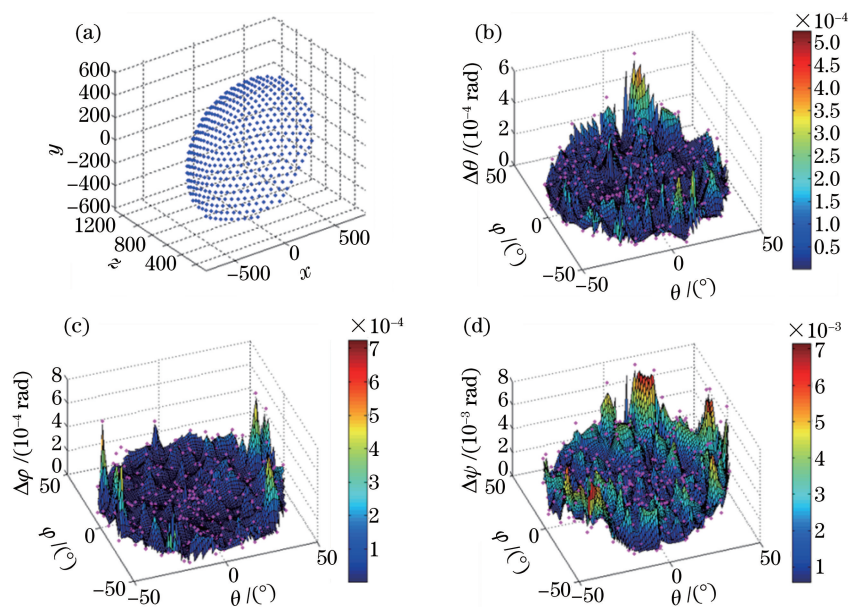


图 12 空间测量点及测量误差。(a)测量点;(b) $\Delta\theta$;(c) $\Delta\varphi$;(d) $\Delta\psi$ 的测量误差

Fig. 12 Space measurement points and measurement errors. (a) Measurement points; measurement errors of (b) $\Delta\theta$; (c) $\Delta\varphi$; (d) $\Delta\psi$

表 1 60° 视场内测量误差

Table 1 Measurement error with the field of view of 60°

Error	Maximum	RMSE
$\Delta\theta / \text{mrad}$	0.38	0.084
$\Delta\varphi / \text{mrad}$	0.29	0.079
$\Delta\psi / \text{mrad}$	4.90	1.961

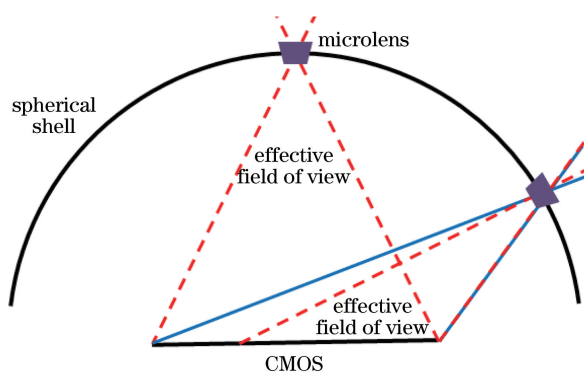


图 13 子眼的有效视场示意图

Fig. 13 Schematic of the effective field of view of the sub-eye

为检验标定完成后复眼系统用于测量的实际效果,使用自制二维激光扫描台对简单面形进行扫描以重构面形。如图 14(a)所示,使用二维激光扫描台对两个相交平面进行扫描,两平面之间的夹角约为 125° 。为增强光斑效果,使用了白色表面材料。对获得的 2000 多个点云数据进行插值重构得到面形,获得的结果如图 14(b)所示。对简单面形的测量结果表明,标定后的复眼系统能够适用于实际物体的测量,以此为基础,可以进一步实现大尺寸物体和复杂面形的测量。

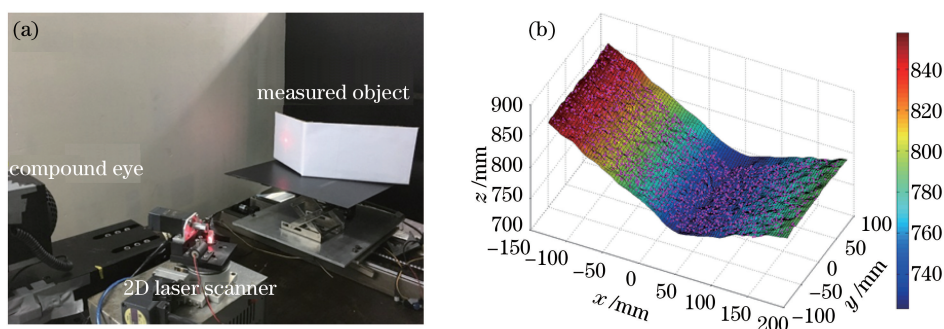


图 14 面形测量。(a)测量装置;(b)测量结果

Fig. 14 Surface measurement. (a) Measuring device; (b) measurement result

6 结 论

在简要介绍所设计的仿生复眼系统结构的基础上,重点研究了大视场条件下复眼的标定方法,探讨复眼的标定和探测定位特点。基于复眼系统特点,提出一种基于虚拟双球面靶标的标定方法,设计了一套基于单LED、高精度二维转台、一维平移台等设备的标定装置,该装置和方法无需考虑复杂的系统成像和畸变模型,可以统一众多子眼的坐标系,能够构建覆盖全视场的高精度靶标,实现无人值守自动化标定,具有较强的灵活性与实用性,适合子眼多、畸变复杂、大视场的复眼系统的精确标定。实验结果表明,基于虚拟双球面的方法能够实现仿生复眼的精确标定,标定完成后的复眼系统可以完成空间目标的测量任务,对开展隧道内壁缺陷检测、古建筑和雕塑外形检测等应用具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] Gong Xianwei, Yu Weixing, Zhang Hongxin, *et al.* Progress in design and fabrication of artificial compound eye optical systems[J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 34-45.
巩宪伟, 鱼卫星, 张红鑫, 等. 仿生复眼成像系统设计与研究进展[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 34-45.
- [2] Floreano D, Pericet-Camara R, Viollet S, *et al.* Miniature curved artificial compound eyes[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(23): 9267-9272.
- [3] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [4] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [5] Chen N Y, Birk J R, Kelley R B. Estimating workpiece pose using the feature points method[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1980, 25(6): 1027-1041.
- [6] Xu Song, Sun Xiuxia, Liu Xi, *et al.* Geometry method of camera self-calibration based on a rectangle[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1115002.
徐 嵩, 孙秀霞, 刘 希, 等. 基于矩形的摄像机自标定几何方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1115002.
- [7] Guo Fang, Wang Keyi, Wu Qinglin. Development of target positioning instrument with multi-channels and large field of view[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 26-33.
郭 方, 王克逸, 吴青林. 多通道大视场目标定位仪的研制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 26-33.
- [8] Ma M C, Guo F, Cao Z, *et al.* Development of an artificial compound eye system for three-dimensional object detection [J]. Applied Optics, 2014, 53(6): 1166-1172.
- [9] Zhang Li. Structure design of antenna pedestal and shaft precision analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
张 力. 天线座结构设计与轴系精度分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [10] Ren Shunqing, Gao Kang, Zhao Hongbo. Measurement method of perpendicularity, axis intersection, alignment error of five-axis simulator[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(10): 1-6.
任顺清, 高 亢, 赵洪波. 五轴台垂直度、相交度、对准误差的测试方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(10): 1-6.
- [11] Eric L A, Timothy J W, Edward R R, *et al.* Method of constrained global optimization[J]. Physical Review Letters,

1994, 72(17): 2671-2674.

- [12] Johann S B, Peter J G. Distributing many points on spheres: minimal energy and designs[J]. Journal of Complexity, 2015, 31(3): 293-326.
- [13] Son H S, Marks D L, Hahn J, *et al.* Design of a spherical focal surface using close-packed relay optics[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16132-16138.
- [14] Ke Yinglin, Zhou Rurong. A new triangulation algorithm for 3D scattered points[J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 1994, 6(4): 241-248.
柯映林, 周儒荣. 实现 3D 离散点优化三角划分的三维算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1994, 6(4): 241-248.
- [15] Zhang Jing. Interpolation of point clouds data based on Kriging interpolation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
张 靖. 基于克里金算法的点云数据插值研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [16] Xu Lu, Zhao Haitao, Sun Shaoyuan. Monocular infrared image depth estimation based on deep convolutional neural networks[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0715002.
许 路, 赵海涛, 孙韶媛. 基于深层卷积神经网络的单目红外图像深度估计[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0715002.