

# 用于大视场三维探测的人工复眼系统几何标定

简慧杰, 何建争, 王克逸

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** 为了实现人工复眼系统的三维探测, 针对人工复眼视场大、成像过程复杂等问题, 提出一种基于双柱面法和反向传播(BP)神经网络的整体几何标定方法。该方法利用 BP 神经网络对任意复杂非线性关系的强大映射能力, 分别在前后两个柱面上对复眼上的每个子眼进行隐式标定, 建立图像像素坐标与柱面上二维坐标的映射关系。三维测量时一个图像上的点映射为前后柱面上的两个点, 连接这两个点得到一条空间直线, 通过最小二乘法求解多条空间直线的交点即可求得三维目标点的坐标。实验结果表明: 在人工复眼  $60^\circ \times 30^\circ$  的视场范围的横向测量误差在 1 mrad 以内, 纵向相对误差在 0.6% 左右。与传统的基于小孔模型的标定方法相比, 该方法无须考虑复眼子眼的成像模型及其参数求解, 而且由于整体标定过程是在同一世界坐标系下进行的, 也不必精确知道各个子眼间的位置和朝向关系。此方法完全适用于人工复眼系统的几何标定, 能够满足其大视场、高精度的标定要求。

**关键词** 机器视觉; 三维探测; 人工复眼; 标定; 反向传播神经网络; 最小二乘法

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0215002

## Geometric Calibration of Artificial Compound Eye System for Large Field of View Three-Dimensional Detection

Jian Huijie, He Jianzheng, Wang Keyi

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

**Abstract** In order to achieve three-dimensional detection of artificial compound eye system and solve such problems as large field of view and complex imaging process, a global geometric calibration method based on two-cylinder and back-propagation (BP) neural network is proposed. In this method, the powerful mapping ability for arbitrary complex nonlinear relationship of BP neural network is used to take implicit calibration on two cylinders respectively, which set up the mapping relationship between the two-dimensional image coordinates and the cylindrical coordinates. In the three-dimensional measurement, the points on an image are mapped to two points on both the front and the back cylinders. Linking the two points we get a space line, and the intersections of multiple spatial lines are solved by the least square method. The coordinates in the three-dimensional target are then obtained. The experimental results show that the angle error of the artificial compound eye system is within 1 mrad at the field of view of  $60^\circ \times 30^\circ$ , and the relative radial error is about 0.6%. Compared with traditional calibration methods based on pore model, this method does not need to consider compound eye imaging model and its parameters. Since the whole calibration process is conducted in the same world coordinates, the direction and location relationships between each eye need not to be accurately known. This method is fully applicable to geometric calibration of artificial compound eye systems, and it can meet the requirements of wide field and high precision calibration.

**Key words** machine vision; three-dimensional detection; artificial compound eye; calibration; back-propagation neural network; least square method

**OCIS codes** 150.1488; 150.6910; 220.2740

收稿日期: 2016-08-11; 收到修改稿日期: 2016-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61275011)

作者简介: 简慧杰(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事嵌入式系统、仿生复眼等方面的研究。

E-mail: jianfeng@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)

## 1 引 言

自然界中的大多数昆虫都有一个或多个复眼作为其视觉器官。复眼由许多子眼构成,通常在昆虫的头部占有突出的位置。不同昆虫的复眼子眼数差别很大,从最少的几个到最多的数万个不等。由于子眼呈曲面分布,昆虫通常拥有很大的视野,例如苍蝇的复眼包含 4000 个可独立成像的单眼,能看清几乎  $360^\circ$  范围。而多子眼的构成方式本身又组成了多目视觉系统,拥有三维立体视觉感知能力。根据昆虫复眼的这些特性,研究人员设计了一个用于目标三维探测的人工复眼系统<sup>[1-2]</sup>。

相机标定是人工复眼系统三维探测的基础。根据标定参数是否有实际意义,可以将相机标定的方法大体分为两类:显式标定和隐式标定。显式标定主要以理想小孔模型为成像模型并在其基础上增加畸变模型,根据标靶上点的空间坐标和其对应的图像点坐标之间的对应关系来计算相机内外参数,典型的显式标定方法有 Tsai 方法<sup>[3]</sup>、张正友标定法<sup>[4-6]</sup>等。而通过隐式标定计算得到的参数没有直接的实际物理意义,只是表示空间坐标和图像坐标之间的对应关系,常见的隐式标定方法有直接线性法<sup>[5]</sup>、神经网络标定法<sup>[7-11]</sup>、基于非参数测量模型的标定方法<sup>[12]</sup>等。由于所设计的人工复眼单个子眼的成像过程比较复杂,除中心子眼外其他子眼的主光轴与成像面不垂直,因此基于理想小孔模型的传统标定方法用于复眼子眼标定时需要进行复杂的非线性畸变矫正,且精度较低<sup>[13]</sup>。而基于双平面的复眼标定方法<sup>[1]</sup>需要采用大尺寸的显示器作为标靶,由于复眼子眼通光孔径比较小,且不能很好地聚焦,而显示器的单位面积亮度比较小,这导致显示器上显示的标靶不能很好地在传感面上成像。显示器本身的平面度误差也会对标定精度产生影响。

本文在研究整理了传统标定方法的基础上,提出一种基于双柱面法和反向传播(BP)神经网络的人工复眼系统整体几何标定方法。圆柱面标靶由发光二极管(LED)标靶条相对高精度转台的转动来合成,避免了制作大面积、高精度的曲面标靶。该方法使所有子眼的标定工作在同一世界坐标系下进行,因此无需已知各个子眼之间的位置和方向关系,相比于使用子眼位置参数的方法<sup>[13]</sup>,该方法能够有效提高精度。图像点和圆柱面上点的映射关系的建立采用神经网络方法,神经网络具有拟合任意复杂非线性映射关系的能力,能够克服人工复眼子眼成像过程复杂的问题。连接两个圆柱面上的点得到空间直线,通过最小二乘法来求得多条空间直线的近似交点。为了评估精度,研究中测量了第三个圆柱面上的点,根据实际坐标与测量坐标计算测量误差。最后分析了误差产生的原因,提出了一些改进方法。

## 2 基本原理

### 2.1 人工复眼的构成

图 1 为人工复眼系统组成结构图。它主要由微透镜阵列、半球形壳、折转透镜和大面阵互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器组成。为简化光学设计,微透镜阵列是由 169 个参数相同的平凸透镜组成。这些微透镜均匀地分布在半球面上,由于焦距相同的各个微透镜距离图像传感器的距离不同,因此引入一个折转透镜来调节不同的微透镜到成像面的光程<sup>[14]</sup>。为了满足大视场成像的要求,采用赛普拉斯(Cypress Semiconductor)公司生产的 LUPA-4000 大面阵图像传感器,该传感器的有效传感面积为  $24.6 \text{ mm} \times 24.6 \text{ mm}$ ,分辨率为  $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ ,最大帧率为  $15 \text{ frame/s}$ 。

曲面分布的多孔径成像设计使人工复眼系统具有在大视场内的三维目标探测能力。本实验所使用的复眼子眼排列方式为正六边形排列,子眼视场角约为  $20^\circ$ ,相邻子眼之间的夹角约为  $7^\circ$ 。空间内一个发光点由复眼所成的像如图 2 所示。

### 2.2 基于双圆柱面的复眼三维测量原理

基于双圆柱面的人工复眼系统三维测量原理如图 3 所示。 $OXYZ$  为世界坐标系,坐标轴  $Z$  与两个同心圆柱面的中轴线重合;坐标轴  $X$  与两圆柱面所在的圆柱体底面平行;坐标轴  $Y$  穿过两圆柱面的形状中心。人工复眼放置于坐标原点  $O$  处,中心复眼的主光轴与  $Y$  轴重合,复眼的竖直方向与  $Z$  轴重合。

假定复眼子眼成像满足理想的小孔成像模型,空间中的一个发光点  $P$  经过复眼的一个子眼的光学中心在像面上成像为一个光斑。因此,该光斑唯一对应一条经过点  $P$  和该子眼中心的直线  $L$ ,假设此直线与两圆柱面的交点分别为  $P_I$  和  $P_{II}$ 。复眼系统的标定就是建立像面上的点分别与两个圆柱面上的点的对应关系。

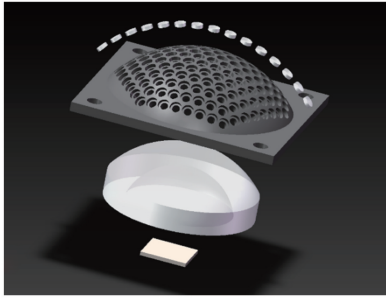


图 1 人工复眼系统结构图

Fig. 1 Structure schematic of artificial compound eye system

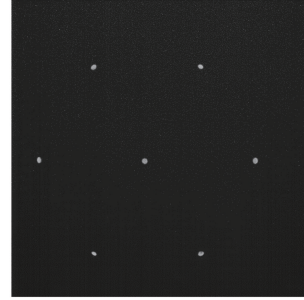


图 2 人工复眼成像示意图

Fig. 2 Imaging schematic of artificial compound eye system

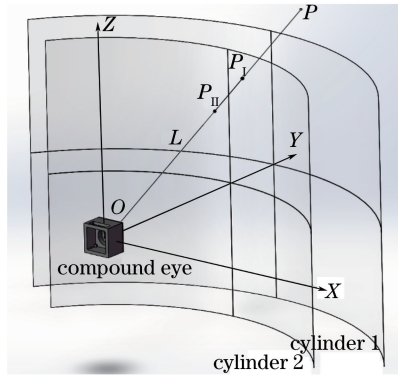


图 3 人工复眼三维测量原理图

Fig. 3 Three-dimensional measurement principle of artificial compound eye

三维测量时,空间中一发光点由多个子眼在传感面上成像为多个光斑。根据成像面上一个光斑的坐标计算出点  $P_{\perp}$  和  $P_{\parallel}$  的坐标,然后求出直线  $L$  的方程。同理可以求得多条直线的方程。由于各种误差的存在,这些直线并不能恰好交汇于一点,利用最小二乘法可以求得近似交点,使得该交点到各条直线的距离的平方和最小。

复眼的所有子眼成像于同一块图像传感器上,子眼之间的成像范围相互重叠,所以给定像面上一组光斑的坐标,不能确定这些光斑是由哪些子眼成的像。但经过遍历所有的子眼组合,发现由正确的子眼组合计算得到的多条直线的交点与这些直线的距离的均方误差最小<sup>[15]</sup>。

### 2.3 基于最小二乘法的多直线相交目标点求解

假设由 BP 神经网络得到的前后两组圆柱面上的点为  $\mathbf{P}_{li}(\theta_{li}, h_{li})$ ,  $\mathbf{P}_{li}(\theta_{li}, h_{li})$ ,  $i=1,2,\dots,n$ ,  $n$  一般为 7~13,表示成三维直角坐标为  $(X_{li}, Y_{li}, Z_{li})^T$ ,  $(X_{li}, Y_{li}, Z_{li})^T$ , 转换公式如下:

$$\begin{cases} X = R \cdot \sin \theta \\ Y = R \cdot \cos \theta, \\ Z = h \end{cases} \quad (1)$$

式中  $R$  为对应的圆柱面的半径。每条入射光线的单位方向向量可以表示为

$$\mathbf{v}_i = \frac{\mathbf{P}_{li}\mathbf{P}_{li}}{|\mathbf{P}_{li}\mathbf{P}_{li}|} \quad (2)$$

由点  $\mathbf{P}_{li}$  和单位方向向量  $\mathbf{v}_i$  可以定义一条空间直线  $(\mathbf{P}_{li}, \mathbf{v}_i)$ , 根据向量积的几何意义,空间一点  $\mathbf{x} = (X, Y, Z)^T$  到直线  $(\mathbf{P}_{li}, \mathbf{v}_i)$  的距离可以表示为

$$d_i = \frac{|\mathbf{x}\mathbf{P}_{li} \times \mathbf{v}_i|}{|\mathbf{v}_i|} \quad (3)$$

两边取平方,根据向量四重积公式化简后可得

$$d_i^2 = (\mathbf{x} - \mathbf{P}_{li})^T (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T) (\mathbf{x} - \mathbf{P}_{li}) \quad (4)$$

式中  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。设距离的平方和函数为  $E(\mathbf{x})$ , 则

$$E(\mathbf{x}) = \sum_i (\mathbf{I} - \mathbf{P}_{li})^T (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T) (\mathbf{I} - \mathbf{P}_{li}) = \sum_i [\mathbf{x}^T (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T) \mathbf{x} - 2\mathbf{x}^T (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T) \mathbf{P}_{li} + \mathbf{P}_{li}^T (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T) \mathbf{P}_{li}], \quad (5)$$

对(5)式求导可得

$$\frac{\partial E(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \sum_i [2(\mathbf{I} - \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T) \mathbf{x} - 2(\mathbf{I} - \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T) \mathbf{P}_{li}], \quad (6)$$

当(6)式等于0时,  $E(\mathbf{x})$ 有最小值,此时:

$$\mathbf{x} = \left[ \sum_i (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T) \right]^{-1} \left[ \sum_i (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T) \mathbf{P}_{li} \right], \quad (7)$$

即为所求交点。

求得交点后对(5)式求平均值即为直线到交点的距离的均方误差,表示为

$$E_{MS} = \frac{1}{n} E(\mathbf{x}). \quad (8)$$

遍历所有的子眼组合可以找到正确的光斑和子眼对应关系,从而得到正确的空间三维交点。

### 3 柱面坐标系的建立与子眼标定

#### 3.1 柱面坐标系的建立

通过高精密转台的转动使得 LED 标靶条在以复眼为中心的世界坐标系中成一个圆柱面。坐标系的建立主要以水平面和铅垂线为基准,坐标轴  $Z$  轴位于转台中心,  $Y$  轴方向与导轨方向平行,  $X$  轴与  $YZ$  平面垂直,坐标原点与 LED 标靶条中间的 LED 在同一水平面上。为了保证坐标系的准确,需要进行一系列的调节与对准步骤,调节与对准原理如图 4 所示。

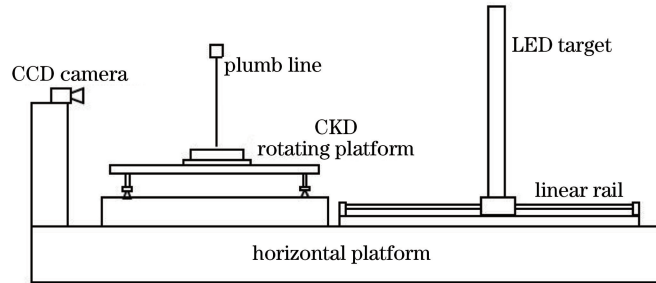


图 4 调节与对准原理图

Fig. 4 Schematic of adjustment and alignment

首先,导轨放置在一个大的水平台面上,调节 LED 标靶条与导轨连接处的垫片的厚度使 LED 标靶条竖直。将高精密转台固定在光学平板上,调节 4 个支柱来改变转台的角度,使用数字水平仪测量,使转台与水平面的角度误差小于  $0.1^\circ$ 。然后使用一个电荷耦合器件(CCD)相机和铅垂线来寻找转台中轴线, CCD 相机的分辨率为  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。转动转台,从 CCD 相机图像上观察并调节铅垂线的位置,当铅垂线与转台中轴线重合时,铅垂线在图像上的位置保持不动,实验时,当铅垂线在图像中的位置变动范围小于 1 个像素即认为铅垂线与转台中轴线重合,同轴度误差在  $0.2 \text{ mm}$  以内。最后,反复调节导轨的位置和朝向,使得 LED 灯条在导轨上前后移动时, CCD 相机图像上铅垂线始终与 LED 灯条重合,如图 5 所示。重合时,铅垂线与 LED 光点中心的连线的平行度在  $0.05^\circ$  以内。

调节完毕后移除铅垂线和 CCD 相机,将复眼及垫块放置在转台上,调节复眼放置的位置使球壳的中心正好位于转台中轴线上。点亮 LED 灯条中间的 LED 灯,采集 CMOS 图像传感器上的图像观察通过复眼中心子眼所成的光斑,调整复眼朝向及垫块厚度,使光斑处于图像中心。根据复眼系统的三维测量原理,复眼壳体中心是否位于转台中心并不影响标定和测量的精度,但是由于复眼方向角探测精度和距离探测精度差别较大,需要将测量结果转换至球坐标来进行评估,因此实验中以复眼球壳的球心作为评估时的球坐标系坐标原点,所以要将壳体中心对准转台中心。由于不影响标定和测量精度,并不需要精确对准。



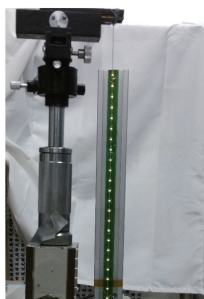


图 5 铅垂线与 LED 标靶条对准示意图

Fig. 5 Diagram of plumb line and LED target strip alignment

### 3.2 标定数据的获取

高精度转台、LED 标靶条和大面阵相机均由上位机控制,LED 灯的逐个亮起和高精密转台的转动形成二维的圆柱面形标靶,大面阵相机在每个位置采集一幅图,并记录下此时亮着的 LED 灯的位置。标定时,转台转动的角度范围为  $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,转动间隔为  $1^{\circ}$ ,LED 灯的高度范围为  $-22\sim 24$  cm,相邻 LED 的间距为 2 cm。因此在一个圆柱面需要采集 1464 张图片。实际每张图片的成像效果均如图 2 所示,每张图上有 7~13 个光斑,这些光斑按六边形排列,每个光斑由不同的子眼成像得到。标定数据获取的任务就是要把分散在不同图片中的光斑重新按照子眼通道数分类。

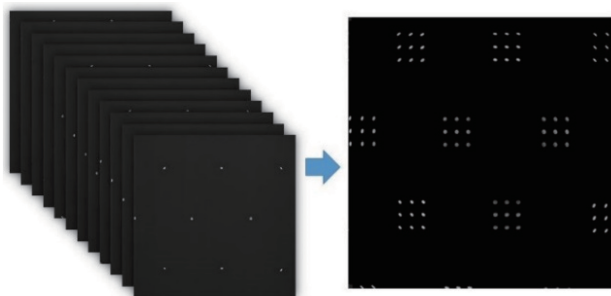


图 6 标定数据获取示意图

Fig. 6 Diagram of calibration data access

为了一次性自动地采集所有子眼的标定数据,并没有采取遮挡其他子眼只由一个子眼成像的方式,而是所有子眼同时对空间一个 LED 成像,得到的每一幅图像上均有至少 7 个光斑。每两个 LED 灯之间位置相差很小,图 6 所示为 9 张相邻位置采集的图片,可以看到,由同一子眼所成的光斑距离比较近。因此已知一幅图像上的光斑所对应的子眼就可以推导出相邻位置图像的光斑所对应的子眼。实验时,记下第一张图像上光斑所对应的子眼,后期处理时总是根据上一张图像来推导现处理图像的光斑所对应的子眼。图像处理时,提取光斑的重心坐标作为特征点,并记下每个光斑重心坐标所对应的子眼通道数和所在图片的圆柱面上 LED 灯的坐标。图像处理完成后,将所有 1464 张图片中的光斑按子眼通道数分类,可以得到各个子眼的图像面数据点集和圆柱面数据点集。

### 3.3 基于 BP 神经网络的子眼标定

在前后两个圆柱面上分别对所有子眼进行标定。对每个子眼,将图像光斑的坐标  $(x_i, y_i)$  作为 BP 神经网络的输入,其对应的圆柱面上的位置  $(\theta_i, h_i)$  作为 BP 神经网络的输出。

采用一个由一个输入层(2 个节点)、一个隐层(10 个节点)和一个输出层(2 个节点)组成的三层的 BP 神经网络,如图 7 所示,其中,隐层传递函数选择  $\text{tansig}$  函数,输出层传递函数选择线性函数。为使其快速收敛,采用 Levenberg-Marquardt 优化算法。设定梯度的目标值为  $1 \times 10^{-3}$ ,当误差曲面的梯度达到这个值时,结束训练。为了评估每个子眼标定的准确度,计算每个子眼标定数据的均方根误差(RMSE)。

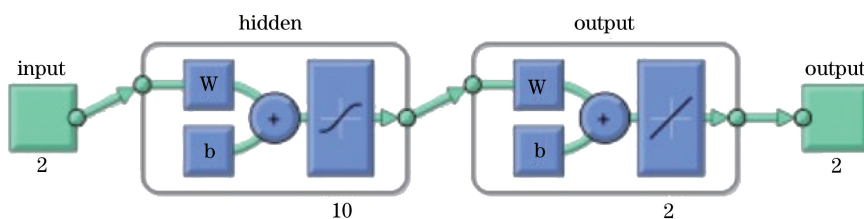


图 7 神经网络原理图

Fig. 7 Schematic of neural network

$$\begin{cases} \theta_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta'_i - \theta_i)^2}{n}} \\ h_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h'_i - h_i)^2}{n}} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\theta'_i, h'_i$  为将图像光斑坐标  $(x_i, y_i)$  输入到神经网络模型得到的预估值,  $n$  为训练数据的点数。

### 4 实验与结果分析

复眼及主要实验装置如图 8 所示, 转台采用日本 CKD 公司生产的 AX4009T 型高精度电动转台, 绝对定位精度为  $\pm 5$  s, 可以通过串口控制其角度位置。LED 标靶条由实验室自制, 相邻 LED 之间的距离为 20 mm, 总长 50 cm, 每个 LED 灯可以通过上位机独立控制。由于 LED 标靶条长度的限制和后续处理工作量较大, 实验中标定了复眼  $60^\circ \times 30^\circ$  的视场范围, 用于验证本研究所提方法的可行性。

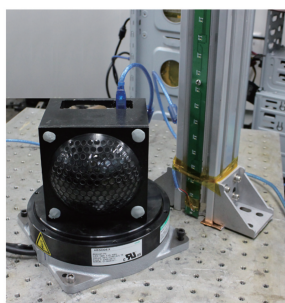


图 8 复眼及实验装置

Fig. 8 Compound eye and experiment device

按照 3.1 节方法建立圆柱面坐标系, 然后分别在半径为 75 cm 和 100 cm 处采集图像, 处理图像提取各个子眼的标定数据点集, 图 9(a) 为中心子眼在半径为 100 cm 处的圆柱面上的数据点集, 图 9(b) 为对应的成

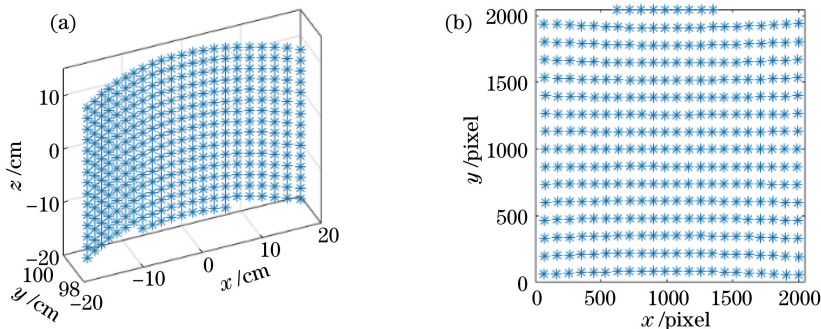


图 9 中心子眼的标定数据。(a) 圆柱面点集; (b) 成像面点集

Fig. 9 Calibration data of center eye. (a) Cylinder point collection; (b) image point collection

像面数据点集。

将上述提取的数据点集作为神经网络训练样本,按照 3.3 节所述方法进行子眼标定,图 10 为中心子眼的神经网络训练残余误差。

标定视场范围内 54 个子眼分别在两个圆柱面上的神经网络训练 RMSE 如图 11 所示,可以看出, $h$  坐标的 RMSE 在 0.05 cm 以内,转换为弧度则在 0.5 mrad 以内; $\theta$  坐标的 RMSE 在  $0.04^\circ$  以内,转换为弧度则在 0.7 mrad 以内。实验结果表明,本研究提出的基于神经网络的标定方法可以保证复眼子眼有较高的测角精度。

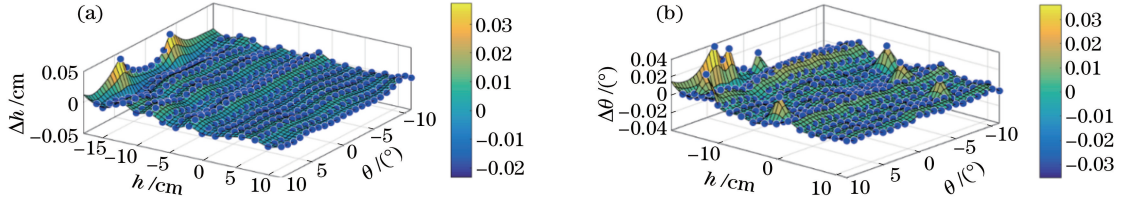


图 10 中心子眼的神经网络训练残余误差。(a)  $h$  坐标残余误差;(b)  $\theta$  坐标残余误差

Fig. 10 Residual errors of neural network training for center eye. (a) Residual error of  $h$  coordinate;(b) residual error of  $\theta$  coordinate

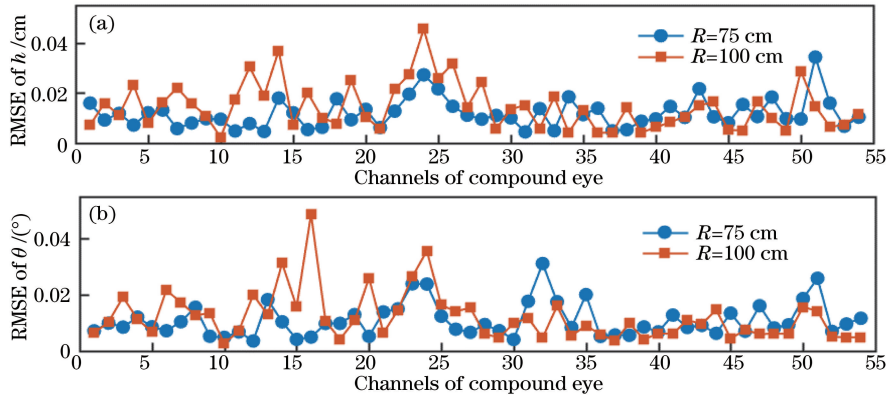


图 11 神经网络训练的 RMSE。(a)  $h$  坐标的 RMSE;(b)  $\theta$  坐标的 RMSE

Fig. 11 RMSE of neural network training. (a) RMSE of  $h$  coordinate; (b) RMSE of  $\theta$  coordinate

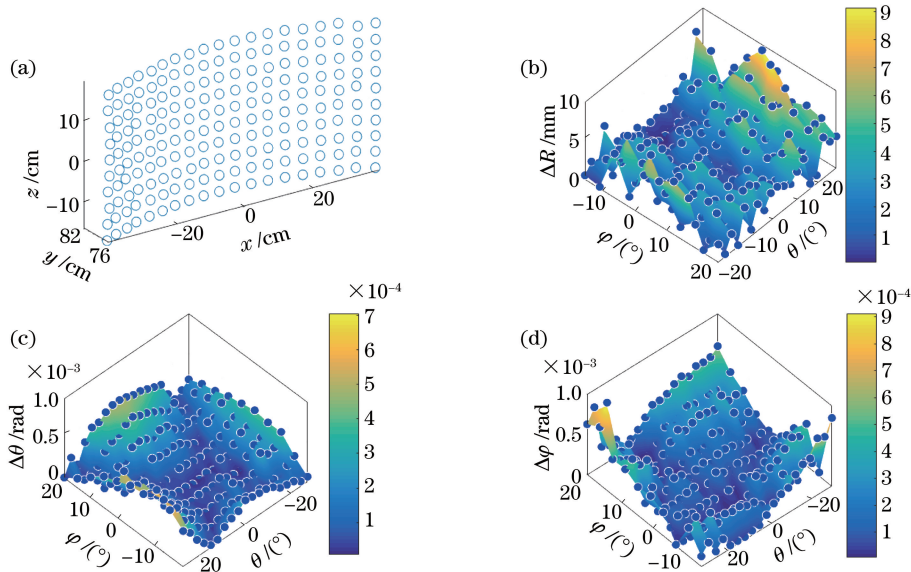


图 12 三维测量坐标及误差。(a)测量点的三维坐标图;(b)  $R$  坐标绝对误差;(c)  $\theta$  坐标绝对误差;(d)  $\phi$  坐标绝对误差

Fig. 12 Three-dimensional measurement coordinates and errors. (a) Three-dimensional coordinates of measured points; (b) absolute error of  $R$  coordinate; (c) absolute error of  $\theta$  coordinate; (d) absolute error of  $\phi$  coordinate

为了评估人工复眼的三维测量精度,采集了半径为 86 cm 处的图像作实际三维测量,相邻坐标之间角度间隔为  $3^\circ$ ,高度间隔为 40 mm,总测量点数为 190。测量得到的三维坐标如图 12(a)所示,由于复眼在横向的探测精度明显优于纵向<sup>[16]</sup>,为了直观地区分横向和纵向的精度,将三维直角坐标  $(x, y, z)$  转换为球坐标  $(R, \theta, \varphi)$ ,然后与理想坐标值相减得到坐标误差。图 12(b)、(c)、(d)分别为  $R, \theta, \varphi$  坐标误差的绝对值。可以看到,三个坐标的误差均是中间较小而边缘较大,在人工复眼  $60^\circ \times 30^\circ$  的视场范围内横向测量精度优于 1 mrad,而纵向的测量误差较大,在距 86 cm 处的测量误差在 5 mm 左右,纵向相对误差在 0.6%左右。测量点三个坐标的 RMSE 如表 1 所示,与图 11 对比可以发现,三维测量的测角精度与子眼标定的测角精度基本一致,验证了本研究提出的标定方法的正确性。

表 1 三维测量坐标的 RMSE  
Table 1 RMSE of three-dimensional measurement coordinates

Coordinate	RMSE
$R / \text{mm}$	4.0249
$\theta / \text{rad}$	$2.4672 \times 10^{-4}$
$\varphi / \text{rad}$	$2.7873 \times 10^{-4}$

人工复眼系统三维测量的精度主要由标定过程和多光线相交算法决定,总结为以下几个方面:

1) 圆柱面坐标系的误差,包括 LED 标靶的误差、转台的误差以及各种装调误差,主要由实验设备和实验条件决定。

2) 参考圆柱面的位置。由于相交光线通过连接两个圆柱面上的点来得到,两个圆柱面的间距越大,所得光线的方向误差越小,但是同时远端的圆柱面所能覆盖的视场范围也越小。如果使近端的圆柱面靠近坐标原点,虽然会使视场覆盖范围变大,但是光斑的密度降低和单个光斑变大导致特征点提取精度变低,会使子眼的标定精度降低,因此实验时需要折中考虑。

3) 光斑特征点提取。由于复眼成像的缺陷,成像面上得到的通常都不是清晰的像,而是一系列模糊的光斑,通常呈圆形或椭圆形。这是限制复眼测量精度的主要因素。本实验采用的是灰度重心法,计算每个光斑的重心作为特征点,实际上也可以拟合椭圆,将椭圆中心作为特征点。处理时随着灰度阈值选取的不同,特征点坐标也会不同。这是限制测量精度提高的复眼本身的因素,改进复眼的成像光路,使复眼在一定范围内成清晰的像,可以有效地提高特征点的精度。

4) 子眼标定方法。本研究采用神经网络来建立图像平面坐标和圆柱面坐标的对应关系,神经网络具有拟合任意复杂非线性映射关系的能力,会把随机的坏数据点和噪声也拟合进子眼模型中,造成拟合精度看似比较理想但与实际子眼模型不符的情况。

5) 多光线相交算法。三维测量时,多直线的交汇算法也会对测量的精度产生影响。本研究采用的是基于最小二乘法的空间多直线交汇算法,即使所有直线到交点的距离平方和最小。但是实际上由于各种误差的存在,并不是所有的直线都是比较精确的。由于不同子眼的不同方向的图像到圆柱面映射的精度不同,有的地方精度高有的地方精度低,因此得到的空间直线的精度也有所差别,并不是越多的直线参与交汇产生的三维交点精度越高,一些精度比较差的直线参与交汇时甚至有可能使三维交点的精度变差。可以引入带权重的多直线交汇算法,使精度较差的光线拥有比较小的权重,精度较好的光线拥有比较大的权重。

## 5 结 论

介绍了用于目标三维探测的人工复眼系统的组成及其测量原理。针对人工复眼视场大、成像过程复杂等问题,提出一种基于双柱面法和 BP 神经网络的几何标定方法,该方法分别建立前后两个圆柱面上的点与成像面上点的映射关系。实际测量时,由成像面上光斑坐标可以得到两个圆柱面上对应点的坐标,根据空间多光线相交的原理求得空间发光点的三维坐标。实际测量结果显示,在人工复眼  $60^\circ \times 30^\circ$  的视场范围的横向误差在 1 mrad 以内,纵向相对误差在 0.6%左右。最后,详细分析了影响复眼测量精度的几个方面的因素。

## 参 考 文 献

- [1] Ma M, 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.
- [2] 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.
- [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. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [5] Abdelaziz Y I, Karara H, Hauck M, *et al.* Direct Linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2015, 81(2): 103-107.
- [6] Li Guangle, Huang Wenyong, Liu Qingsong, *et al.* Improved Zhang's calibration method and experiments for underwater binocular stereo-vision[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1215006.  
李光乐, 黄文有, 刘青松, 等. 面向水下双目视觉的改进张氏标定方法及实验[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1215006.
- [7] Tian Zhen, Zhang Qi, Xiong Jiulong, *et al.* Large-scale camera calibration with neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0415001.  
田 震, 张 玘, 熊九龙, 等. 基于神经网络的大范围空间标定技术[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0415001.
- [8] Cai Sheng, Li Qing'an, Qiao Yanfeng. Camera calibration of attitude measurement system based on BP neural network [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(7): 832-834.  
蔡 盛, 李清安, 乔彦峰. 基于 BP 神经网络的姿态测量系统摄像机标定[J]. 光电子 • 激光, 2007, 18(7): 832-834.
- [9] Jin Weilong, Zhou Meiyong. Study on calibration of binocular stereovision based on BP neural network with different layers[J]. Optical Technique, 2015, 41(1): 72-76.  
金伟龙, 周美英. 基于不同 BP 网络层数的双目立体视觉标定研究[J]. 光学技术, 2015, 41(1): 72-76.
- [10] Tian Xiaochao, Li Zhongke. Binocularvision 3D measurement system calibrated by dual plane method[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(3): 54-57.  
田小超, 李忠科. 双平面法标定的双目视觉三维测量系统[J]. 电光与控制, 2015, 22(3): 54-57.
- [11] Wen Tao, Zuo Dongguang, Li Zhongke, *et al.* Robust accurate camera calibration method[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(11): 3489-3491.  
文 涛, 左东广, 李忠科, 等. 一种鲁棒的高精度摄像机标定方法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(11): 3489-3491.
- [12] Long Changyu, Zhu Jigui, Guo Yin, *et al.* Study on close-range photogrammetry based on nonparametric measurement model[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1215004.  
隆昌宇, 郝继贵, 郭 寅, 等. 基于非参数测量模型的摄影测量方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1215004.
- [13] Guo Fang, Wang Keyi, Yan Peizheng, *et al.* Calibration of compound eye system for target positioning with large field of view[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 913-920.  
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.
- [14] Ma Mengchao. Research onartificial compound eye system for 3D object detection[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.  
马孟超. 用于目标三维探测的复眼系统设计研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [15] Guo F, Yan P Z, Wang K Y. Lenses matching of compound eye for target positioning[C]. SPIE, 2012, 8420: 84200B.
- [16] Ma M, Wang K. Improvement on object detection accuracy by using two compound eye systems[C]. SPIE, 2014, 9282: 92820G.