

文章编号 1004-924X(2012)05-0913-08

用于大视场目标定位的复眼系统标定

郭方, 王克逸*, 闫佩正, 吴青林

(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:探讨了设计的大视场复眼定位系统的结构特点、定位数学模型、三维目标阵列、标定方法和定位特点。介绍了复眼结构和系统装置,建立了目标定位和多通道同时标定的数学模型。通过引入分光器,调整目标平面水平移动轴和目标平面的垂直性以及目标平面和复眼平面之间的平行性。然后,使用消逝点和目标共像点求得初始点和初始距离,得到目标平面上每一点的空间三维坐标。最后,求出目标阵列与对应通道的入射角度,提取出对应的目标像点重心,建立了各通道入射角度和像点重心之间的对应关系。实验结果显示,初步标定后的系统能对横向 110° 、纵向 90° 视场范围内的目标进行定位,距离定位精度在2%以内。提出的方案基本能满足复眼成像非线性标定的要求,具有一定的操作灵活性。

关键词:复眼系统;标定;大视场;目标定位

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122005.0913

Calibration of compound eye system for target positioning with large field of view

GUO Fang, WANG Ke-yi*, YAN Pei-zheng, WU Qing-lin

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

* Corresponding author, E-mail: kywang@ustc.edu.cn

Abstract: To position the target with a large field of view for a novel compound eye system, the design features of the system, mathematical models for positioning target, three-dimensional coordinates of target array, calibration methods and the positioning performance were investigated. Firstly, the design of the compound eye system and its structure were introduced and a mathematical model for positioning the target was established. With an optical splitter, the verticality between target plane and its horizontal movement axle and the parallelity between target plane and compound eye plane were adjusted. Then, By using the methods of vanishing points and the common imaging point of different points on the Y-axis to get the initial point and initial distance, the three-dimensional coordinate of every point located on the target plane was obtained. Finally, by deriving the angles between every target and corresponding channel to achieve the imaging center, the corresponding relation between the angle of each channel and the imaging center was established. Experimental results show that the system calibrated initially can position the target with the viewing angle within 110° on the horizontal

收稿日期:2011-11-25;修订日期:2011-12-29.

基金项目:航空科学基金资助项目(No. 20080178002);国家自然科学基金资助项目(No. 51005222)

plane and 90° on the vertical plane and the distance precision for target positioning can be limited to 2%. The scheme can meet the requirement of compound eye for nonlinear calibration and has operational flexibility.

Key words: compound eye system; calibration; large field of view; target positioning

1 引言

近年来,随着仿生学的发展,复眼的应用也受到越来越多的关注^[1-4]。由于复眼具有多通道同时成像的特点,对运动目标具有高灵敏度反应能力,可以快速完成近距离场合下大视场的目标探测、定位以及图像的超分辨重构等任务,因此在军事、医疗以及航空等领域都有着潜在的应用价值。但受透镜光学加工工艺的限制,复眼透镜易在目标点与成像点之间产生非线性畸变。在一些机器视觉测量领域,这种畸变对测量结果的精度有很大的影响。

国内外一些学者对这种视觉成像畸变情况进行了大量的研究。Zhang、Hartley、Jun 分别研究了基于平面格点模板、自标定、神经网络等标定技术^[5-7];同时其它学者也对使用消逝点或纯旋转的标定方式进行了研究^[8-11]。2004 年 Richard Hornsey 小组设计了一种多达 20 个子眼组成的复眼^[12],每一个子眼分别成像在大约 150 个像素直径的图像传感器区域。用一个放在复眼平面前方的固定场景作为参考系进行系统标定。大约使用 100 个位置来标定每一个视场角。根据一系列目标在成像平面上的位置,采用最小二乘法确定变换系数,从而计算出参考面上目标的位置。Krishnasamy^[13]针对复眼成像系统的标定问题,采用 Z-平移和消逝点处理技术,完成了以确定图像中心为基准的标定。

本文在研究簇眼标定的基础上,进一步探索了复眼系统的标定工作。由于所设计的复眼成像系统采用了曲面分布的多透镜阵列和折转透镜两层成像结构,和传统相机的成像方式有很大区别。根据复眼结构,各个子眼的位置已经固定,各通道的坐标可视为已知。若用于标定的目标点空间三维坐标已知,则可通过建立的数学模型同时对多通道成像进行标定,从而省去了对各个子眼分别进行标定的大量工作。基于以上思路,本文详细

探讨了成像系统的标定方法和实现步骤。最后分析了影响精度的因素。

2 复眼

系统主要由球面基底、玻璃透镜、折转透镜和平面探测器等组成,如图 1 所示。通过在外层球壳的不同位置打阶梯孔来放置玻璃透镜,其同时能起到视场光阑的作用。内层为折转透镜,对于单个通道而言,它的口径很小,可看作一棱镜,通过折转主光线能有效改善光线的成像质量,使系统达到较大的视场角^[14]。CMOS 图像传感器用来接收目标的多通道成像像点,每个单独的通道都对应一定的视场。

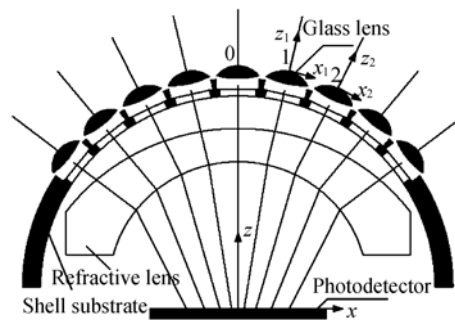


图 1 复眼结构和坐标系

Fig. 1 Coordinates system and structure of compound eye

球壳的外球面半径为 60 mm,内球面为 55 mm;折转透镜的外球半径是 50 mm,内球半径是 42 mm,偏心量为 12 mm;玻璃透镜的半径均为 3 mm。透镜阵列具体的三维分布由子午面绕基轴旋转形成,每 1 个通道又是周围 6 个最近通道所构成正六边形的中心,这种排列方式在尽量避免盲区的同时又符合紧密排列的原则。子午面上分布 15 个通道,相邻通道之间夹角为 7° ,整个系统共由 169 个通道组成,视场角最大可达 110° 。为便于分析,把位于中心的透镜定义为主透镜(主通道),其余通道定义为辅助透镜,然后对每个通

道进行编号并对各通道建立自己的坐标系。通道编号如图 2 所示。

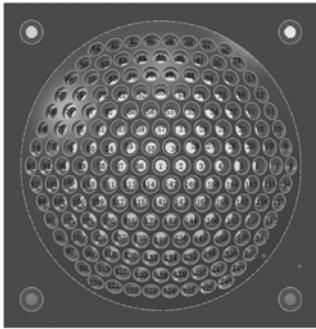


图 2 复眼通道编号

Fig. 2 Number of channel on compound eye

复眼后面的 CMOS 图像传感器具有 $2\ 048 \times 2\ 048$ 个像素单元^[15],每个像素大小为 $12\ \mu\text{m}^2$,成像面为 $24.6\ \text{mm} \times 24.6\ \text{mm}$ 。在 33 MHz 系统时钟下最高像素读出速率可达 66 MHz,像素经 FPGA 采集后通过 USB2.0 传输到 PC 机做进一步处理。集成后的复眼目标采集系统如图 3 所示,主要由以下几部分组成:复眼后座,里面分别放置折转透镜和 CMOS 及其驱动电

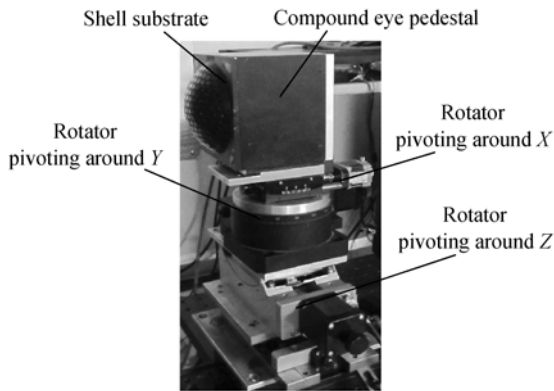


图 3 复眼成像系统

Fig. 3 Imaging system of compound eye

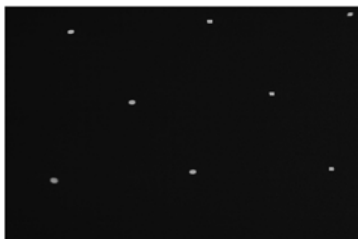


图 4 复眼目标多通道成像

Fig. 3 Multichannel imaging with compound eye

路板;复眼基底,它所在的法平面定义为复眼平面;绕复眼 X,Y,Z 轴旋转的旋转台。图 4 是 $4.8\ \text{mm} \times 4.8\ \text{mm}$ 的目标光源在距离复眼 1 m 左右处被复眼多通道同时捕捉到的成像图。

3 目标定位数学模型

目标定位一般使用小孔成像模型进行分析,在这种模式下,目标点和透镜中心以及像点间共线。因此,如果目标点能同时被复眼的多个透镜捕获,则各像点及其对应的透镜中心连线将交于一点^[16],即目标点。但实际成像过程中,由于透镜像差以及机械加工装调等工艺的影响,在透镜成像过程中不可避免地存在非线性畸变(图 5),并且畸变随着偏离透镜光轴角度的增大而增大。

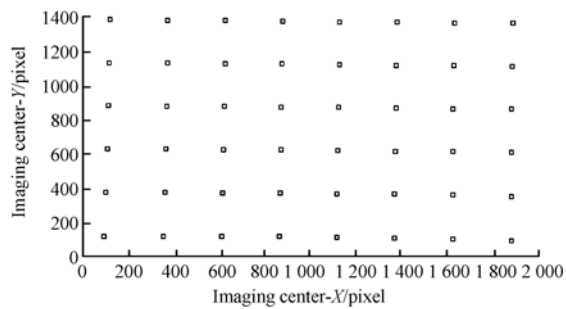


图 5 主通道成像畸变

Fig. 5 Imaging deformation of main channel

由于所设计的复眼系统具有透镜阵列和折转透镜的双层结构以及多通道成像到单 CMOS 平面的特点,直接建立物像点之间的校正数学模型较为困难。因此本文将此问题分为两部分来考虑,第一部分是目标点与各透镜中心之间的几何关系,通过方向向量参数建立线性方程;第二部分是各透镜入射光线方向向量与成像点之间的关系,通过校正各透镜入射角与像点之间的对应关系,然后再使用第一部分的线性模型计算出目标的空间三维坐标。首先对第一部分中目标与单通道透镜中心之间的几何关系进行分析。

设 $P(X_0, Y_0, Z_0)$ 和 $P'(X_i, Y_i, Z_i)$ 是空间两点坐标。那么连线 PP' 可以用向量 $\mathbf{p}'(\tan \beta, \tan \gamma, 1)$ 来表示。

令 $\mathbf{p}'(\tan \beta, \tan \gamma, 1) = \mathbf{p}'(a, b, c)$, 其中 $a = \tan \beta, b = \tan \gamma, c = 1$ 。因此经过 P, P' 连线的方

程为

$$\frac{X_i - X_0}{a} = \frac{Y_i - Y_0}{b} = \frac{Z_i - Z_0}{c}. \quad (1)$$

则每一个透镜中心和目标点之间的直线方程可表示为

$$\frac{X_i - X_{0i}}{a_i} = \frac{Y_i - Y_{0i}}{b_i} = \frac{Z_i - Z_{0i}}{c_i}, \quad (2)$$

其中 (X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}) 分别为各通道原点的世界坐标, $i=1, \dots, 169$ 。

由于各个通道分别定义了自己的坐标系, 因此在实际计算中还要对坐标系进行统一。为方便起见, 把主透镜的坐标系定义为世界坐标系, 并且把主透镜中心定义为世界坐标原点。数学模型中的坐标变换遵从欧氏变换法则。一般来说, 从一个坐标系到另一个坐标系之间的变换包括绕 X, Y, Z 轴的旋转 φ, θ, ψ 和平移 T_x, T_y, T_z 。由于复眼系统特有的结构, 子眼坐标系到世界坐标系之间的转换可简化为二维旋转: 绕 Y 轴的旋转 θ 和绕 Z 轴的旋转 ψ 。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi & \sin \psi \sin \theta \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\sin \theta \cos \psi \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}.$$

则子眼坐标系下的方向向量 \mathbf{p} 与其对应世界坐标系下的方向向量 \mathbf{p}' 满足关系

$$\mathbf{p}' = \mathbf{R}\mathbf{p}. \quad (3)$$

因此, 如果知道每一个透镜中心的世界坐标及它和目标点之间的方向向量 \mathbf{p}' , 世界坐标系下目标点和透镜之间的线性公式就可以根据公式(2)得到。其中式(2)又可以写做

$$\begin{cases} A_{11}x + B_{11}y + C_{11}z + D_{11} = 0 \\ A_{12}x + B_{12}y + C_{12}z + D_{12} = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

假设目标点 $P(x, y, z)$ 同时被 n 个子眼捕获到, 则 $\mathbf{M}\mathbf{X} = \mathbf{D}$ 。其中矩阵 \mathbf{M} , 向量 \mathbf{X} 和 \mathbf{D} 分别为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & C_{11} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n2} & B_{n2} & C_{n2} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X} = [x, y, z]^T,$$

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

此为一个超定性方程, 若 \mathbf{M} 满秩, 令 $\mathbf{C} = \mathbf{M}^T \mathbf{M}$, 物体的空间三维点坐标可以表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{D}. \quad (5)$$

4 复眼系统非线性标定

4.1 标定内容

由以上分析可知, 如果数学模型中的 p 已知, 并且各个透镜中心坐标由机械加工精度可作为已知参数, 则可根据式(5)求出目标的三维坐标。因此, 系统标定的主要工作是得到目标像点重心坐标与入射角度之间的对应关系。定位目标时, 再根据这种对应关系插值反求出式(3)中的 \mathbf{p} , 最后转换到世界坐标系下的向量 \mathbf{p}' 。

4.2 多透镜标定数学模型

系统共有 169 个通道, 若对每一个透镜分别进行标定则需要大量细致的工作。由方程(2)可知

$$a_i = c_i \frac{X - X_{0i}}{Z - Z_{0i}}; b_i = c_i \frac{Y - Y_{0i}}{Z - Z_{0i}}.$$

如果用于标定的目标三维坐标已知, 继而可由上式求出目标与每一个通道之间在世界坐标系下的方向向量 $\mathbf{p}' \left[\frac{a_i}{c_i}, \frac{b_i}{c_i}, 1 \right]$, 坐标变换到各通道子坐标系后, 可求出各通道对应的入射角

$$\begin{cases} \beta_i = \arctan \frac{a_i'}{c_i'} \\ \gamma_i = \arctan \frac{b_i'}{c_i'} \end{cases}. \quad (6)$$

因此, 可以通过产生不同三维坐标已知的目标点来求出对应到每一个通道的 β_i, γ_i , 从而避免了对每一个通道透镜分别进行标定, 简化了标定过程, 提高了标定精度。

4.3 标定步骤

目标定位数学模型的第一部分可以通过线性求解。由于成像畸变的影响, 第二部分需要通过系统校正才能获得这种非线性关系。根据上节分析, 本文首先利用了光学和机械设备产生三维目标已知的点阵列, 然后建立起这种像点-角度对应的非线性关系。其流程图如图 6 所示。

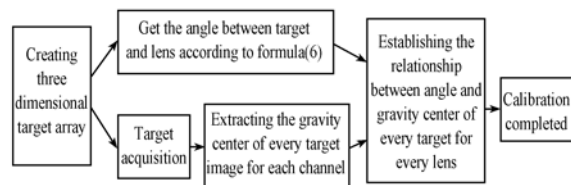


图 6 复眼标定流程图

Fig. 6 Flowchart of compound eye calibration

4.3.1 生成三维目标阵列

本实验使用一个分光镜 (Agilent 10706A plane mirror interferometer)、一个半导体激光器、水平仪、水平移动导轨以及等离子电视来获得阵列目标点的三维坐标,如图 7 所示。电视由 $1\,920 \times 1\,080$ 个像素点组成,每个像素大小为 $0.48\text{ mm} \times 0.48\text{ mm}$,点对点显示用来产生目标。系统能实现横向 110° 、纵向 90° 视场范围内的目标标定,满足大视场的要求。

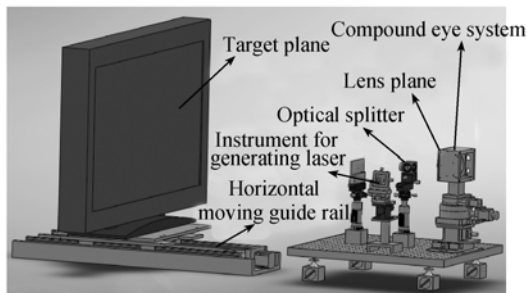


图 7 复眼标定设备

Fig. 7 Calibration equipment for of compound eye

根据实验条件,如果要精确获得目标的三维坐标,则需要保证:(1)水平移动轴线与目标平面垂直;(2)目标平面与复眼平面平行;(3)目标平面的行列与复眼世界坐标系 X, Y 轴一致;(4)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之间的距离已知。

4.3.1.1 系统平行性调整

实验中首先由激光器通过分光器产生一束与目标平面垂直的光线,然后根据平移台移动过程中目标平面入射光点的偏离度来判断目标平面移动方向是否与 Z 轴一致。接着由激光器发出的光线经分光镜打到目标平面,通过调整分光镜的调节装置使反射光和入射光重合,并经分光镜入射到复眼平面,然后再调整复眼姿态使反射光与入射光重合保证目标平面与复眼平面之间的平行性(图 8)。坐标系之间的平行关系通过水平仪来保证,以水平仪发出的水平线为基准,分别调整目标平面的行列光点和复眼 X, Y 坐标轴重合。

4.3.1.2 目标初始点

初始点定义为主透镜光轴与目标平面的交点,并以此为参考计算目标平面上其它目标点的三维坐标。根据文献[8],位于主透镜光轴上的目标点在水平移动过程中其像点位置是不变的,而

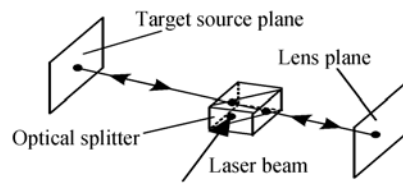


图 8 目标和复眼平面间的平行性调整

Fig. 8 Adjustment of parallelity between planes of target and compound eye

其他目标像点在成像面上则会随着水平移动具有不同的成像位置。实验中在目标平面上生成目标点阵列,水平移动后产生 4 个目标平面。由于各平面间已经标定平行,因此各点世界坐标只有 Z 不同。提取各平面目标经主透镜成像像点重心后,再根据消逝点求出对应的目标初始点^[13],结果如图 9 所示。

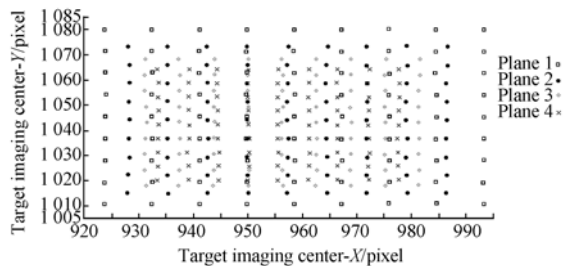


图 9 消逝点确定目标平面初始点

Fig. 9 Finding initial point of target plane with vanishing points

4.3.1.3 目标点初始距离

得到初始点之后,还必须确定它与主透镜之间的距离。如图 10 所示, ST 是 CMOS 平面, EF 是主透镜, AC 是初始平面, BD 是移动后的平面, MN 是主透镜光轴, A 是平面初始点。 z_2 可以通过步进电机移动参数得到。 C, D 位于 Y 轴上。

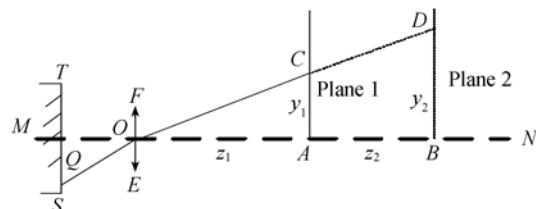


图 10 初始距离测量图

Fig. 10 Measurement of initial distance

如果不同目标点 C, D 在 CMOS 上的像点重合, y_1, y_2 参数可以由像素距离算出,然后由几何

关系可得到初始距离

$$z_1 = \frac{y_1 \times z_2}{y_2 - y_1} \quad (7)$$

以上步骤完成后,找出初始点在 CMOS 像面上的重心坐标为(950,1 037),对应到目标平面的坐标是(510,1 063)。以初始点为基础,沿着 Y 轴正向产生 9 个目标点,然后控制电机移动水平移动台 100 mm,找出两个平面 Y 轴上像素间最小距离为 0.01 pixel 的两个不同像点对应到目标平面的目标点坐标分别为(510,1 066)、(510,1 067)。由式(7)求得初始距离 Z_0 为 300 mm,因此初始点(510,1 063)的世界坐标为 $Z_0(0,0,300)$ 。

4.3.2 建立非线性对应关系

从目标平面(3,3)开始逐点显示 20×67 个点目标阵列,两点间距为 13.92 mm(图 11)。根据初始点和初始距离计算出这些点目标的空间三维坐标,然后根据式(6)求出各个点目标对应到接收通道的入射角,最后得到各个通道入射角与对应目标在 CMOS 上像点重心坐标之间的非线性对应关系(图 12)。

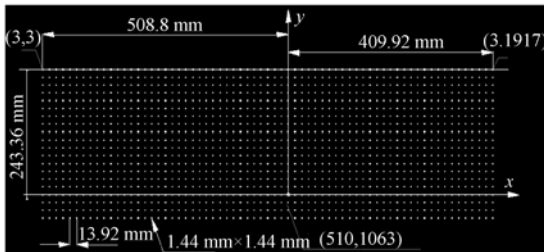
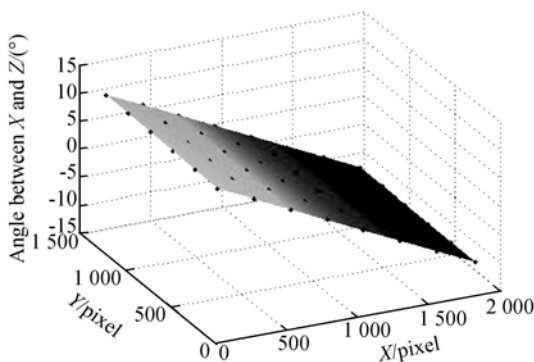


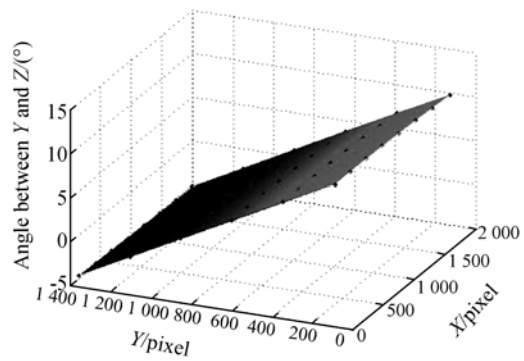
图 11 标定平面目标阵列

Fig. 11 Target array for calibration plane



(a) X-Z 夹角

(a) Angle between X and Z axes



(b) Y-Z 夹角

(b) Angle between Y and Z axes

图 12 主通道透镜向量角度-像素坐标对应关系

Fig. 12 Corresponding relation between angles and pixel coordinates for main lens

4.3.3 实验结果分析

为检验系统目标定位数学模型和标定效果,控制电机后移目标平面 75 mm,按照标定目标设置产生目标点,分别测定这 1 340 个目标点,并对复眼接收像点数大于 4 个以上时的目标进行定位。分别采集并提取各点被多通道捕获的成像重心坐标,使用标定建立的角度-重心坐标对应关系进行插值求出各个通道对应的角度,并转换到世界坐标系下的方向向量后,根据式(5)求出每一个目标的三维坐标。图 13 是每个通道接收到的实际目标入射角度与理想情况下的均方差

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (A_i - B_i)^2 / n}$$
 (A_i 为实际角度, B_i 为计算角度)。图 14 为所有测试目标的坐标误差。

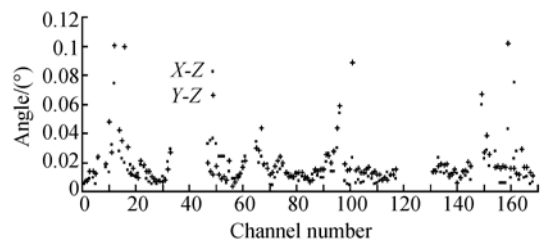
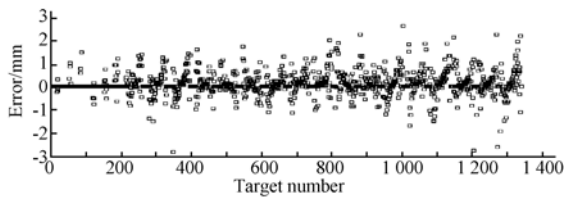


图 13 169 通道角度均方差

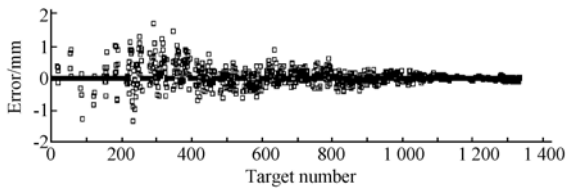
Fig. 13 Mean square errors of angles for 169 channels

其中,图 14 中的目标序号为 $(n-1) + m$ (n 为目标点的行号, m 为列号)。从图中可以看出,相比簇眼系统的标定,在更大视场的情况下,目标三维定位的相对误差仍然可以控制在 2% 以内,通道角度误差平均在 0.02° 以下。误差主要

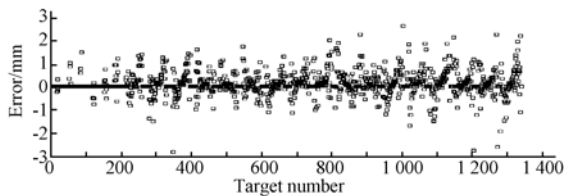
由以下几个方面造成:(1)系统平台对准的影响。



(a) X-axis



(b) Y-axis



(c) Z-axis

图14 定位目标三维坐标误差

Fig. 14 Position errors for test targets

目标平面的水平移动轴和目标平面的垂直度、目标平面和复眼平面的平行性以及目标平面的行列与复眼坐标系的一致性对系统影响很大;(2)初始点和初始距离的求取精度不高;(3)靠近复眼边缘的透镜成像质量较差,从而使目标重心的提取精度降低;(4)插值精度的影响,特别是目标重心坐标位于插值边界处时对定位的影响;(5)机械加工精度的影响。

5 结 论

本文在简要介绍所设计的复眼结构基础上,重点探讨了复眼的大视场标定方法,研究了复眼系统的标定和定位特点。通过建立目标定位数学模型,反求出三维目标对应的各通道入射角,最后建立了各子通道入射角度及其像点间的对应关系,从而实现了复眼系统的多通道同时标定,提高了标定效率,减少了系统标定误差。实验结果显示,所采用的标定方案是切实可行的,标定后的系统能够对横向 110° 、纵向 90° 视场范围内的目标进行探测和定位。所设计的复眼系统能够实现较高精度的三维目标定位,距离定位精度可以控制在2%以内。

参考文献:

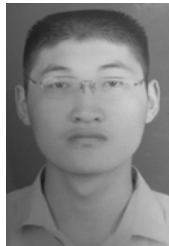
- [1] JEONG K, KIM J, LEE L. Biologically inspired artificial compound eyes[J]. *Science*, 2006, 312(28): 557-561.
- [2] JUSTH E W, KRISHNAPRASAD P S. Steering laws for motion camouflage[C]. *Proceeding Royal Soc. A*, 2006, 462:3629-3643.
- [3] 芦丽明,王国峰,张科,等. 蝇复眼在导弹上的应用研究[J]. *红外技术*, 2001, 23(5):9-10.
LU L M, WANG G F, ZHANG K, et al.. Research on multi-mode missile based on ommateum [J]. *Infrared Technology*, 2001, 23(5):9-10. (in Chinese)
- [4] DUPARRE J, RADTKE D, TUNNERMANN A. Spherical artificial compound eye captures real images[J]. *SPIE*, 2007, 6466(64660):1-9.
- [5] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [6] HARTLEY R I. An algorithm for self-calibration from several views[J]. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994, 6: 908-912.
- [7] JUN J, KIM C. Robust camera calibration using neural network[J]. *In Proc. IEEE Reg. 10 Conf. tencon*, 1999, 1:694-697.
- [8] CAPRILE B, TORRE V. Using vanishing points for camera calibration[J]. *The International Journal of Computer Vision*, 1990, 4(2):127-140.
- [9] LIEBOWITZ D, ZISSERMAN A. Metric rectification for perspective images of planes [J]. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 1998, 6: 482-488.
- [10] HARTLEY R. Self-Calibration from multiple views with a rotating camera [J]. *Proc. Third European Conf. Computer Vision*, 1994, 5: 471-478.
- [11] STEIN G. Accurate internal camera calibration u-

- sing rotation, with analysis of sources of error[J]. *Proc. Fifth Intl Conf. Computer Vision*, 1995, 6: 230-236.
- [12] HORNSEY R, THOMAS P, WONG W, *et al.*. Electronic compound-eye image sensor: construction and calibration[J]. *SPIE*, 2004, 5301: 13-24.
- [13] KRISHNASAMY R, THOMAS P, PEPIC S, *et al.*. Calibration techniques for object tracking using a compound eye image sensor[J]. *SPIE*, 2004, 5611: 42-52.
- [14] 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.
- CAO ZH L, ZHAN ZH X, WANG K Y. Structural design of spherical compound eye lens for moving object detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 70-73. (in Chinese)
- [15] Cypress Semiconductor Corporation. LUPA-4000 4M Pixel CMOS Image Sensor Datasheet [Z]. 2007.
- [16] 王克逸, 张浩, 曹兆楼, 等. 复眼位标器的标定与探测[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1807-1813.
- WANG K Y, ZHANG H, CAO ZH L, *et al.*. Calibration and detection of compound eye model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1807-1813. (in Chinese)

作者简介:



王克逸(1962—),男,河北保定人,教授,博士生导师,1995 于中国科学院等离子体物理研究所获工学博士学位,1995 至 1996 年在中国科学技术大学精密机械与精密仪器系读博士后,现从事近场光学和微光学的教学和科研工作。E-mail: kywang@ustc.edu.cn



闫佩正(1989—),男,山东泰安人,硕士研究生,2007 年 11 月至 2009 年 6 月参与国家创新性试验计划,2009 年至今参与光电信息实验室项目,主要从事光电信息检测方面的研究。E-mail: ypz@mail.ustc.edu.cn



郭方(1977—),男,安徽阜阳人,博士研究生,现从事光电信息检测方面的研究。E-mail: davidace@mail.ustc.edu.cn



吴青林(1976—),男,安徽安庆人,中国科学技术大学精密机械与精密仪器系在读博士后,现从事微透镜阵列制作方面的研究。E-mail: wuql@ustc.edu.cn