

复眼三维目标定位精度分析

郭 方¹, 练国富², 张 宁²

- (1. 福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118;
2. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘 要:为提高视觉测量系统的精度,以复眼结构为模型,着重探讨了复眼系统的多子眼在提高目标定位精度中的作用,并进行系统的仿真分析。首先,对复眼结构进行了简要介绍。随后利用 Zemax 建立了复眼的入射模型。接着,设定标定目标平面并逐点设定空间三维坐标并得到标定点与透镜中心之间的入射角度。然后,建立起入射角度与对应像点之间的关系作为标定结果。最后,根据标定结果分别利用复眼中不同子眼数对空间目标点坐标进行求取。分析结果显示:利用复眼多子眼共同定位目标较传统的双目视觉能获得更高的精度,并且精度会随着子眼数目的增加而提高,该方案为复眼的实际制作和应用提供了良好的指导作用。

关键词: 复眼定位; 三维目标; 高精度

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4088-06

Positioning precision analysis for three-dimensional target based on compound eye system

Guo Fang¹, Lian Guofu², Zhang Ning²

- (1. Department of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Department of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to prompt the positioning precision for three-dimension target, a compound eye system is introduced, and the process that the multi-eye of compound eye influences on the positioning precision was analyzed, and the simulation analysis was finished. Firstly, a compound eye as the positioning system was introduced. Subsequently, the optical model of incident ray from target to imaging lens was built. Next, three-dimension coordinates of special target array points are set. According to the three-dimension coordinate of each target point and the three-dimension coordinate of its imaging lens, the incident angle from the target to its imaging lens was solved. Then, the corresponding relation between every incident angle and its imaging point coordinate was established as the calibration result of the imaging system. Finally, the three-dimension coordinate of a target point was solved with various sub-eyes according to the calibration result. The simulation results show that the compound eye system with multi-eye could provide higher positioning precision, and the more sub-eyes, the higher precision.

收稿日期: 2014-04-10; 修订日期: 2014-05-15

基金项目: 福建省教育厅资助项目(JB13142, JA13216); 福建省自然科学基金(2013J01168); 福建工程学院科研发展基金项目(GY-Z13013); 福建工程学院科研启动基金(GY-Z12078)

作者简介: 郭方(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电信息处理方面的研究工作。Email: davidace@mail.ustc.edu.cn

The scheme can guide the manufacture of compound eye for target positioning with high precision and expand its applicable range in the further.

Key words: compound eye positioning; three-dimension target; high precision

0 引 言

目标三维定位在机器人导航、目标跟踪、三维物体重构以及民用工业测量等领域都有着广泛的应用^[1-4]。在目标三维定位技术的过程中,由于机器视觉能够快速获取信息、构造简单、操作移动方便以及低成本等,成为目标三维定位技术人员的首选。当前,随着国家工业和国防的快速发展,对传统基于光电的双目视觉测量精度和方式提出了更高的要求。根据参考文献[5],基于双目视觉的目标定位精度严重受着摄像机标定技术、目标点图像的特征提取、物距以及基线长度等因素的影响。于是,为适应现代社会的快速发展,如何设计系统结构和算法水平来提高目标的定位精度,已成为国内外一些研究机构的主要任务^[6-9]。

近年来,由于自然界复眼的曲面结构,多子眼可以从不同角度同时成像,从而可以为我们提供更多的空间信息,促进了仿生复眼的快速发展,其应用也得到了诸多学者的大量研究^[10-12]。于是,为获得较双目视觉更高的定位精度,文中以一种复眼系统结构为模型,以双目视觉定位为基础,对复眼多目视觉的定位精度进行了初步仿真分析。

1 双目视觉定位

1.1 定位原理

双目视觉系统的空间三维目标定位是基于视差原理,如图 1 所示,其中 P 为三维空间的一目标点, P_{o1} 、 P_{o2} 分别是 P 在两个成像面上的像点,每个成像通道有自己的像素坐标系 (u, v) 、图像坐标系 (X, Y) 以及相机坐标系 (X_c, Y_c, Z_c) ,为了坐标系一致,又规定了统一的世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) ^[13]。

若目标 P 经过透镜成像在成像面上的成像过程遵从从小孔成像模型,则空间 P 点的三维坐标 $P(X, Y, Z)$ 可由以下方程组求出:

$$(u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1)X + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1)Y + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1)Z = m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1$$

$$(v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1)X + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1)Y + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1)Z = m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \tag{1}$$

$$(u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2)X + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2)Y + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2)Z = m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2$$

$$(v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2)X + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2)Y + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2)Z = m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \tag{2}$$

其中,公式(1)为空间点 P 与左成像面 C1 像点之间的直线方程,公式(2)为空间点 P 与右成像面 C2 像点之间的直线方程, $(u_1, v_1, 1)$ 和 $(u_2, v_2, 1)$ 分别是 P 点在成像系统中的图像齐次坐标, $(X, Y, Z, 1)$ 是世界坐标系下的齐次坐标, m 变量为摄像机的内外部参数。

根据几何关系,上述中的 3 个方程就可唯一确定空间点坐标 $P(X, Y, Z)$,但是实际中由于噪声的存在,难以求出精确解,往往使用最小二乘法来提高解的精度。

小孔成像模型只是一种理想的模型,实际的系统由于透镜的作用,会使目标点 P 的光线经过透镜后发生偏转,从而偏离这种理想模型。于是对于一个目标点的两个像点,首先要将其校正到理想小孔成像像点,然后再利用小孔成像模型求解,此过程也被称为相机的标定。

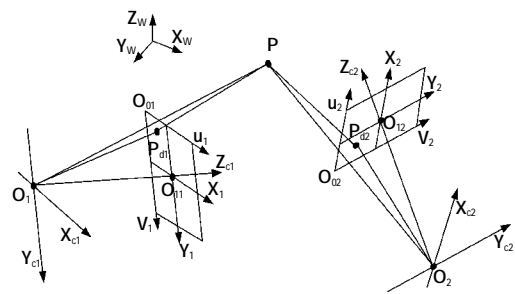


图 1 双目视觉定位原理

Fig.1 Positioning principle with binocular vision

1.2 定位精度的影响因素

根据参考文献[5],双目视觉的目标定位精度主要受摄像机标定、特征提取、基线长度等的影响。

(1)摄像机标定的影响

空间任一目标在实际成像过程中,由于透镜畸变,其实际像点会偏离小孔成像中的像点,因此对于

实际的目标定位,要列出公式(1)和公式(2)的方程组,需要完成实际像点到小孔模型的像点转换。所以,实际像点到小孔模型像点的转换效果对目标定位结果有着重要影响。

(2)特征提取的影响

空间目标都具有一定的体积,同时图像传感器都是以离散形式的像点转换图像,因此在目标特征提取过程中,其像点的精确位置无法在图像上得到反映。这在一定程度上也影响了目标定位的精度。

(3)基线长度的影响

参考文献[5]中指出基线长度的变化不仅会引起系统结构的改变,而且会直接影响测量精度。一般来说,双目视觉中的成像通道的基线长度 T 越大,测量误差减小,且焦距越大,测量误差越小。

在双目视觉中,其精度受着多种因素的复合影响。因此为提高视觉的定位精度,文中探讨多目视觉的定位方式。

2 复眼多目视觉

2.1 复眼结构

为分析多子眼的目标定位精度,文中以一个视场角为 150° 的复眼系统为模型。整个系统由 75 个小型摄像模块(通道)组成(见图 2(a)),各相邻子眼之间视场角重叠范围为 20° 左右,每个单独的通道都对应一定的视场。复眼球壳内外半径分别为 70 mm 和 65 mm ,整个系统既能满足大视场探测的要求,又能对同一目标同时成像。图 2(b)为根据设计的复眼结构用 Zemax 仿真出来的复眼光学模型。为便于仿真设计,每个成像通道由单透镜和图像传感器组成,图像传感器像素大小为 $512\text{ pixel}\times 512\text{ pixel}$ 。每个像素大小为 $2.7\text{ }\mu\text{m}\times 2.7\text{ }\mu\text{m}$ 。

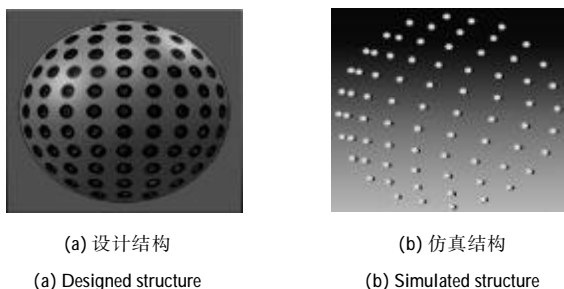


图 2 复眼结构
Fig.2 Structure of compound eye

为便于后续目标定位数学模型的分析 and 计算以及子眼的识别和图像处理等,分别对每一个子眼进行编号,如图 3(a)所示。其对应编号在计算机内的二维数组存储方式如图 3(b)所示。

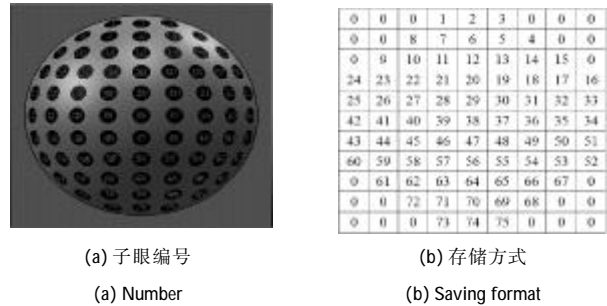


图 3 复眼子眼编号及存储方式
Fig.3 Number of compound eye and its saving format

2.2 目标三维定位模型

根据 2.1 可知,由图 4 可以看出,空间任一目标点同时被复眼中的两个以上成像通道接收到的情况。



图 4 单目标多复眼子眼捕捉
Fig.4 Designed and simulated structure of compound eye

复眼作为一种视觉成像系统,同样存在着透镜畸变问题(见图 5),并且这种变形会随着目标点偏离成像透镜光轴的增大而增大^[14]。

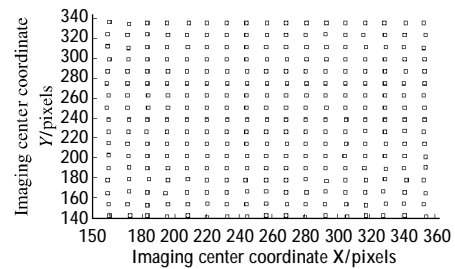


图 5 中心通道成像畸变图
Fig.5 Imaging distortion of the center imaging unit

入射光线经过透镜而产生的这种畸变情况为我们根据像点和透镜中心坐标定位空间三维目标带来很大困难。目前,根据目标像点来构建空间直线方程已有很多理论和方法,但也可将目标点、透镜和像点三者分为两部分:其一是目标点与透镜中心坐标之间的线性几何部分,线性方程可通过方向向量的形式表示,即透镜中心的三维坐标和入射光线与各坐

标轴之间的夹角。而第二部分则建立目标像点与向量夹角之间的对应关系。反求三维目标的坐标时,首先根据像点求出其对应的向量角度,然后再由向量角度和透镜中心三维坐标列出目标点与这个成像透镜之间的入射光线方程^[15]。第一部分的向量线性方程分析如下。

设 $P(X_0, Y_0, Z_0)$ 和 $P'(X_i, Y_i, Z_i)$ 两个三维空间点坐标。则 PP' 可用向量 $p'(\tan\beta, \tan\gamma, 1)$ 表示。

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

$$\frac{X_i - X_0}{a} = \frac{Y_i - Y_0}{b} = \frac{Z_i - Z_0}{c} \quad (3)$$

则每一个透镜中心和目标点之间的直线方程可表示为:

$$\frac{X_i - X_{oi}}{a_i} = \frac{Y_i - Y_{oi}}{b_i} = \frac{Z_i - Z_{oi}}{c_i} \quad (4)$$

式中: (X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}) 分别为各成像通道的世界坐标 ($i = 1, \dots, N$)。

即,若复眼系统中的每一个通道透镜中心的世界坐标以及入射光线与各透镜坐标轴之间的夹角已知,就可以根据公式(4)得到对应的向量方程。将公式(4)进行适当变形为:

$$\begin{cases} A_{i1}x + B_{i1}y + C_{i1}z + D_{i1} = 0 \\ A_{i2}x + B_{i2}y + C_{i2}z + D_{i2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

假设目标点 $P(x, y, z)$ 同时被 n 个子眼捕获到,则

$$MX = D$$

式中: 矩阵 M , 向量 X 和 D 分别为:

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

$$X = [x, y, z]^T$$

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

利用最小二乘法解此方程组为:

$$X = C^{-1}M^T D \quad (6)$$

其中, $C = M^T M$ 。

3 复眼成像通道的标定

3.1 标定内容

由以上分析可知,如果数学模型中的入射角度已知,并且各个透镜中心坐标由机械加工精度可作为已知参数,则可根据公式(5)求出目标三维坐标。因此标定的主要工作是得到每个通道目标像点中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 $p'(\tan\beta, \tan\gamma, 1)$ 。为简化仿真内容,文中只对图 3(b)复眼系统中 36-40、45-49、27-31 共 15 个子眼通道进行分析。

3.2 多透镜标定数学模型

根据标定内容可知,标定的主要任务是求出入射向量角度与像点之间的对应关系。由公式(4)可知:

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

若已知空间目标的三维坐标,则可以反求出目标点与每一个成像通道之间的方向向量 $p'(\frac{a_i}{c_i}, \frac{b_i}{c_i}, 1)$,进而可求出各成像通道对应的向量入射角:

$$\begin{cases} \beta_i = \arctan \frac{a_i}{c_i} \\ \gamma_i = \arctan \frac{b_i}{c_i} \end{cases} \quad (7)$$

于是可以根据产生的不同已知三维位置的目标点求出每个对应成像通道的向量角度 β_i, γ_i 阵列。

3.3 标定过程

根据以上分析,文中首先在 Zemax 仿真系统中分别设置目标点的三维坐标,每设置一个三维坐标点,可求出对应 15 个成像通道的像点坐标。当所有标定目标阵列点设置完成后,并且对应各成像通道的像点全部计算完成后,就得到每个成像通道的像点-角度之间的对应关系作为标定结果^[16],流程图可以表示为图 6 所示。

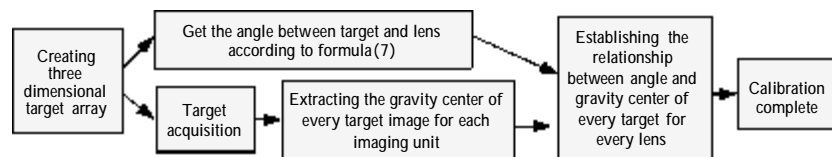


图 6 复眼的标定过程

Fig.6 Process of calibrating compound eye

3.4 非线性对应关系的建立

为标定复眼系统中的 15 个成像通道，在 $z=430$ 的目标平面上 $(80, 80) \sim (-80, -80)$ 范围内逐点显示 17×17 个点目标阵列，两点间间距为 10 mm (见图 7)。每一个三维目标点都有 15 个透镜同时成像，像点范围或者在图像传感器接收范围之内，或者在接收范围之外。对于在接收范围之内 的成像通道，利用高斯拟合法计算出像光斑中心位置。同时根据公式 5 求出目标点与对应成像通道连线的方向向量，进而得出每个点目标与接收成像通道透镜之间的入射角，同时提取出该目标像点的中心坐标，最后建立起角度-像点之间的非线性对应关系(见图 8)。

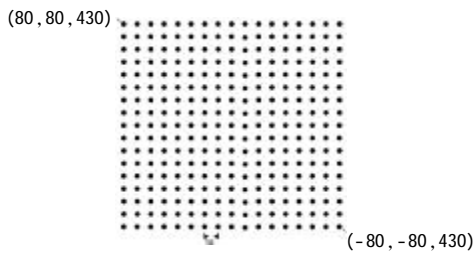


图 7 标定平面目标阵列

Fig.7 Target array for calibration plane

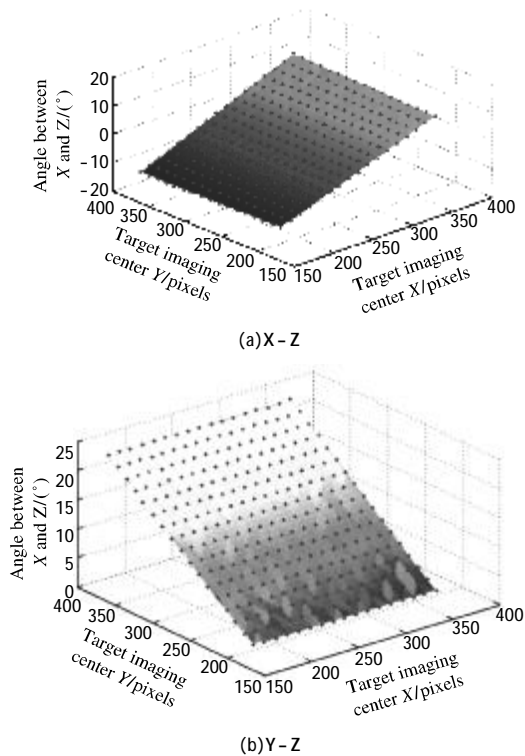


图 8 第 37 成像通道像点中心坐标-角度对应关系

Fig.8 Corresponding relation between imaging center coordinates and angles of 37th imaging channel

4 定位精度分析

为分析复眼成像系统中多子眼通道对同一目标的定位精度,在完成以上标定任务时,在相对复眼的空间位置上设定一个点目标 $P(23.5 \text{ mm}, 15 \text{ mm}, 495 \text{ mm})$ 。由公式(4)可知,如果目标点被两个以上的成像通道接收到,就可以根据空间位置关系确定它的三维坐标,所以利用这 15 个透镜中的 2 个、3 个、4 个、...、15 个成像通道分别进行计算空间点 P 的三维坐标,其不同成像通道个数计算出点 P 的三维坐标分别如图 9 所示。

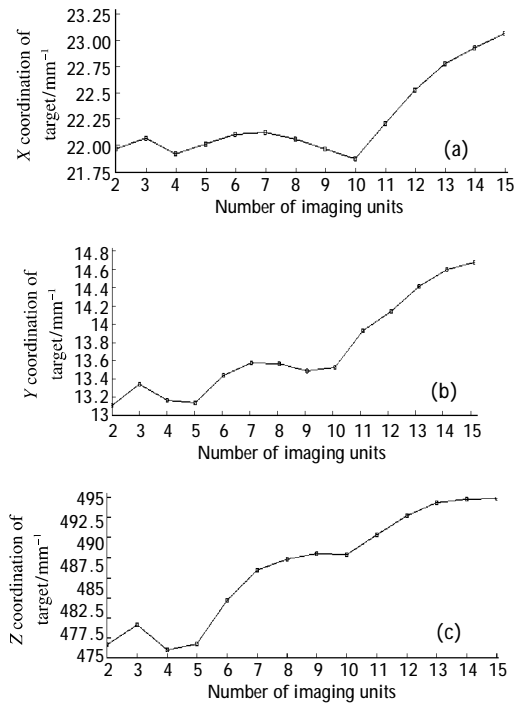


图 9 不同子眼的定位坐标误差

Fig.9 Position error for test target with different number of compound sub-eyes

从图 9 中可以看出，不同成像通道数计算出来的三维坐标各有差异。在参与运算的通道数较少时，特别是双目视觉(两个成像通道)情况时,由于标定精度有限,其误差很大,但随着参与计算的通道数增加,其结果值逐渐与点 P 的实际三维坐标接近,即空间定位精度得到了提高。

5 结 论

文中根据双目视觉定位精度存在的不足，为获

得更高的视觉定位精度,以一种复眼系统为模型,并根据复眼定位目标的数学模型以及复眼系统的各子眼通道标定内容、过程和标定特点,探讨了复眼系统中多子眼通道在提高空间点目标视觉定位精度的性能。实验结果显示复眼系统的多通道能较传统的双目视觉(复眼系统中两个成像通道的情况)定位精度更高,并且定位精度会随着复眼系统中参与运算的子眼通道数的增加而提高。然而,文中只是对复眼系统的初步仿真分析,其具体的深入研究将是下一步的工作重点。

参考文献:

- [1] Guo Lei, Zhu Jigui, Ye Shenghua. Precision registration of corresponding uncode points in large-sized 3D surface measurement using three images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1079-1082. (in Chinese)
- [2] Li Dun. Space warning system for the location and prediction of targets [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001.
- [3] Jia Yunde. *Machine Vision*[M]. Beijing: Science Press, 2000: 15-24. (in Chinese)
- [4] Wei Yi, Yang Wanhai, Li Hongyan. Accuracy analysis of 3D passive location with infrared [J]. *Infrared*, 2002, 2: 11-14. (in Chinese)
- [5] Liu Fengcai, Xie Minghong, Yan Guolin. Accuracy analysis of binocular stereo vision system[J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(19): 280-285. (in Chinese)
- [6] Larsson Soeen, Kjellander J A P. An industrial robot and a laser scanner as a flexible solution towards an automatic system for reverse engineering of unknown objects [C]// *Proceedings of the 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2004: 341-350.
- [7] Jirawinut R, Prakoonwit S, Cecelja F, et al. Visual odometer for pedestrian navigation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, 52 (4): 1166 - 1173.
- [8] Fadi Dornaika, Christophe. Pose estimation using point and line correspondences[J]. *Real-time Image*, 1999, 5(3): 215-230.
- [9] Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Qiu Zhiqiang. Approach of determination of object's 3D pose from mono-view [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(1): 77-79. (in Chinese)
- [10] Cao Zhaolou, Zhan Zhenxian, Wang Keyi. Structural design of spherical compound eye lens for moving object detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (1): 70-73. (in Chinese)
- [11] Shi Lifang, Ye Yutang, Deng Qiling, et al. Method to fabricate artificial compound eye [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2462-2466. (in Chinese)
- [12] Duparre J, Radtke D and Tunnermann A. Spherical artificial compound eye captures real images [J]. *Proc SPIE*, 2007, 6466(64660): 1-9.
- [13] Ma Songde, Zhang Zhengyou. *Computer Vision-calculation theory and Fundamental Algorithms* [M]. Beijing: Science Press, 1998: 52-59. (in Chinese)
- [14] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 965-980.
- [15] Wang Keyi, Zhang Hao, Cao Zhaolou, et al. Calibration and detection of compound eye model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1807-1813. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)