

文章编号 1004-924X(2013)01-0026-08

多通道大视场目标定位仪的研制

郭 方^{1*}, 王克逸², 吴青林²

- (1. 福建工程学院 信息科学与工程系, 福建 福州 350108;
2. 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:研制了一种在大视场范围内可靠性高、功耗低的便携式目标定位仪器。研究了该系统采用的光、机、电、定位数学模型、标定方案以及在目标定位过程中根据像点识别对应通道的算法等。首先,根据大视场的要求设计了透镜阵列曲面分布的结构,加工了安放透镜的球壳基底,并将它们成像在同一个图像传感器上。采用折射透镜进一步优化了光路系统,从而改善了成像质量。编写了相应的驱动程序完成了图像的采集和数据高速传输,然后,建立了所设计复眼系统的定位数学模型,并对复眼成像系统进行了标定。最后,根据像点匹配通道算法,实现了目标的三维定位,并在此基础上进行了简单的三维零件轮廓测量。实验结果表明:系统对横向 66°、纵向 43°视场角的目标实际三维测量精度误差在 2%左右,表明本仪器能完成大视场范围内的目标三维定位任务。

关键词:复眼;目标定位仪;大视场;多通道;三维定位

中图分类号:TH741;O439 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132101.0026

Development of target positioning instrument with multi-channels and large field of view

GUO Fang^{1*}, WANG Ke-yi², WU Qing-lin²

- (1. Department of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China;
 2. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)
- * Corresponding author, E-mail: davidace@mail.ustc.edu.cn

Abstract: To implement the high reliability and low power consumption, a small-scale target positioning instrument with multi-channels and a large field of view was developed. The optical, mechanical, electronic, mathematical models were built and a calibrating scheme and the algorithm to distinguish the corresponding channels for the imaging points in target positioning were investigated. First, the surface distribution structure of a lens array was designed according to the requirement of large field of view, a spherical shell substrate for installing lenses was machined, and the whole lenses were imaged on one CMOS. Subsequently, the imaging quality was improved by the designed refractive lens and the drivers of CMOS and USB2.0 were developed. Then, a mathematical model for the designed com-

收稿日期:2012-09-03;修订日期:2012-10-17.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61275011);国家自然科学基金资助项目(No. 51005222);福建工程学院科研启动基金资助项目(GY-Z2078)

pound eye system was established, and the system calibration was completed. Finally, by the distinguished algorithm for the channels of their imaging points, the target positioning was completed, and three dimensional contours of a large part was measured based on the designed system. Experimental results indicate that the actual measured error for the target is about 2%, whose viewing angle is covered with 66° on the horizontal plane and 43° on the vertical plane of the compound eye. It can satisfy the system requirements of three dimensional target positioning with a large field of view.

Key words: compound eye; target positioning instrument; large field of view; multi-channels; three dimensional positioning

1 引言

当前,不管是机器人导航,还是三维物体测量,都会涉及到三维定位的问题。目标三维定位技术可完成特定目标的测量、三维重构、监控、探测和自动跟踪等任务。许多年来,学者们一直致力于这项技术的研究,并获得了丰富的研究成果^[1-4]。特别随着计算机视觉技术的发展,用光、电技术获取目标的三维信息因具有速度快、结构简单、成本低廉且便于移动、操作方便等优点,而广泛地应用于工业测量、公共安防监控、采矿、医疗和军事等领域;然而当前技术仍不能满足生产生活对系统的智能化、可靠性、集成性、便携式、实用性和低功耗等方面的要求。目前,基于机器视觉的定位技术及其设备严重限制了其在军事、工业和社会生活中的使用范围。因此,为满足现代化社会的需要,如何提高系统定位的可靠性、实用性以及准确程度,成为系统设计和研究的主要任务^[5-8]。

近年来,随着仿生学的发展,复眼的应用成为各个行业学者关注的焦点^[9-13]。由于复眼具有多通道同时成像和子眼曲面分布的结构特点以及高的神经网络集中处理数据能力,因此可在近距离、大视场条件下完成对高灵敏度运动目标的探测、定位、超分辨重构以及高精度三维目标测量等任务,这在很大程度上弥补了双目视觉所具有的视场小、可靠性低、功耗高和操作不便等缺陷,因此复眼在军事、医疗以及航空等领域具有潜在的应用价值。

目前,复眼系统主要有两种:(1)微透镜方式;(2)多相机组合(单相机扫描)方式。相机拼接方式的复眼的可视距离远,但要处理的数据量比较大,且对使用场合要求严格;微透镜方式的复眼具

有紧凑的机械性能,但是可视距离近,并且需加入隔离装置,这使加工工艺更加复杂。

基于此,本文设计并制作了一种介于微透镜复眼和相机阵列复眼之间的复眼系统,并将它用于目标定位。该复眼系统比微透镜方式的通光量大,同时还具有结构简单、易于生产、制造等特点;不仅能实现大视场场景到平面图像传感器的映射,还具有高效的图像采集和数据传输及处理能力,作者利用该系统完成了大视场范围内任一目标的定位任务。

2 复眼系统设计

为满足大视场定位的设计要求,本课题设计的复眼系统如图1所示。此复眼系统模型包括成像模块、像素采集模块以及数据传输模块等。

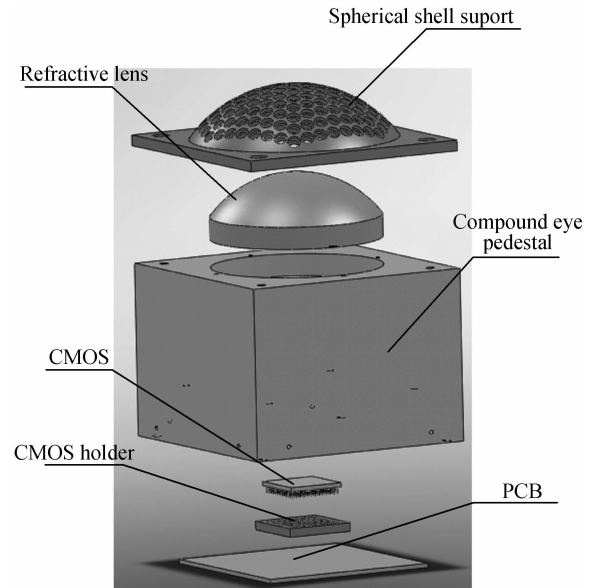


图1 复眼系统

Fig. 1 System of compound eye

2.1 复眼系统成像模块

复眼成像模块由图 1 中折射透镜以上的部分组成,主要包括用来安装子眼透镜的复眼曲面球壳基底、子眼透镜以及折射透镜等。

复眼球壳作为透镜安装的基底在整个复眼系统中起着重要的作用,它直接决定着复眼的外形,进而控制了复眼视场角的大小及成像的性能和方式。其设计过程是在曲面金属球壳上利用数控等加工手段打上一种三维规律分布的阶梯孔,用来容纳复眼的各个子透镜。球壳上的孔也可当做孔径光阑或视场光阑,以保证单个通道只接收到指定视场角的光线,从而防止通道间光线的串扰,提高系统的成像质量。根据视场角的要求,整个复眼球壳上分布了 169 个阶梯孔,球壳内外半径分别为 60 mm 和 55 mm,球体弧度为 109°。

为满足透镜间排布均匀、高填充比的要求,复眼各子眼透镜间采用类六角形的排布方式(见图 2)。为便于区分,球壳表面透镜的安装位置用通道表示;同时为便于后续数学模型的分析 and 计算,本文对每一个子眼进行了编号(见图 2),并分别建立了复眼全局坐标系和各子眼坐标系(见图 3)。如图 3 所示,子眼通道的坐标原点位于子眼透镜的光学几何中心, z 轴与球冠面在该点的法向方向一致, x 轴和 y 轴分别与球冠面相切。全局坐标系与通道 1 子眼坐标系重合。

由于每个阶梯孔都对应一个复眼子透镜。复

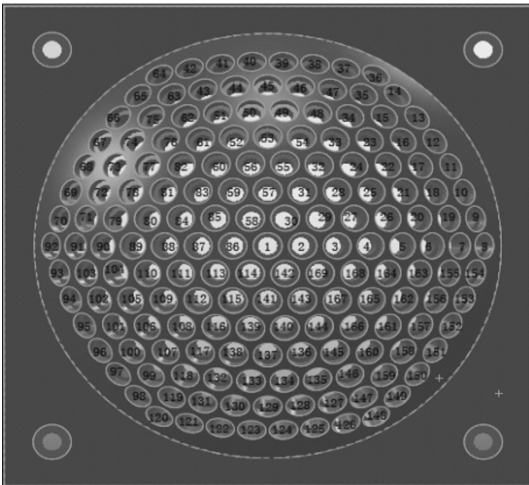


图 2 复眼透镜阵列编号

Fig. 2 Lenses array numbers of compound eye

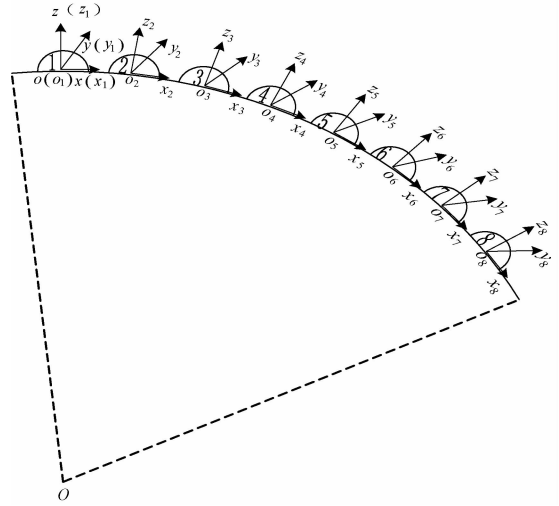


图 3 复眼坐标系定义

Fig. 3 Coordinate system definitions of compound eye

眼子透镜分别负责汇聚不同区域的目标并成像到图像传感器平面。与阶梯孔径一致,系统总共包含 169 个子透镜,同样按照类六边形分布规则排列。根据透镜的曲面排布与平面图像传感器之间的映射关系,为改善大视场范围内经过曲面阵列透镜映射到平面图像传感器入射光线的成像质量,在球面透镜阵列与平面图像传感器之间加入了折射透镜,使各个视场角的入射光线尽量与图像传感器的平面垂直。通过系统仿真,本文设计出外球面半径为 50 mm、内球面半径为 30 mm、偏心量为 12 mm 的折射透镜^[14]。

2.2 像素采集和数据传输模块

系统选用 LUPA-4000 的图像传感器作为复眼图像接收部件,并通过 EP2C8Q208C8 芯片产生驱动时序来完成像素值的采集^[15]。采集的数据经 USB 控制芯片 CY7C68013 高速传输到 PC 机做进一步处理。像素数据的采集和传输过程如图 4 所示。其中,CY7C68013 作为一款内部集成微控制器 USB2.0 协议的芯片,负责数据的缓冲和协议解析以及与上位机的通信;EP2C8Q208C8 在 CY7C68013 和 LUPA-4000 之间起中间枢纽作用,控制着图像传感器的数据采集,并把采集的数据送到 CY68013,然后由固件程序把数据传输到 PC 机;上位机则包含了根集线器和 USB 主控制器,通过上位机驱动程序对 CY7C68013 芯片进行配置和识别后,由应用程序调用 API 函数实现与 CY7C68013 的通信以及结果的显示等。

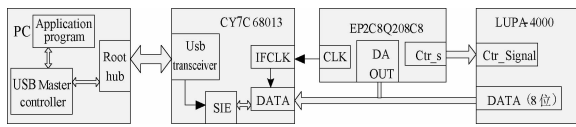


图 4 复眼图像获取流程图

Fig. 4 Flow chart for obtaining compound eye image

2.3 图像采集和数据稳定性测试

复眼的光机电部分设计完成后,按照图 1 把各部件安装到复眼系统的固定位置。使用安装后的复眼成像系统对电脑屏幕的一个鼠标手进行图像采集,并经 USB2.0 把数据传到 PC 机,显示结果如图 5 所示,所获图像较为清晰,多个透镜能同时成像在同一个 CMOS 上。但是各个通道间的像点又有着细微的差别,其原因主要有两个:(1)不同光线经不同透镜入射到 CMOS 的距离不同;(2)不同光线经不同透镜与 CMOS 平面的入射角度的倾斜程度不同。重复多次图像测试,结果表明本系统的数据传输速率较高,稳定性好,能够满足设计要求。



图 5 复眼系统成像图

Fig. 5 Image of compound eye system

3 复眼定位数学模型

根据图 1 可知,本论文所设计的复眼成像系统具有 3 层结构,也就是说目标点光源成像到图像传感器要经过两次折转(见图 6),这与单透镜成像系统有很大的不同。为便于分析,本文考虑入射光线经过子眼透镜和折射透镜到像点之间路径的特点,把图 6 中每条物像间的光线几何轨迹拆分为两部分:第一部分是透镜中心到目标点之

间的线段 PO_1 ;第二部分是透镜中心到图像传感器成像点间的线段 O_1P_3 ,并采用向量表示这两部分,从而有利于成像系统的标定。

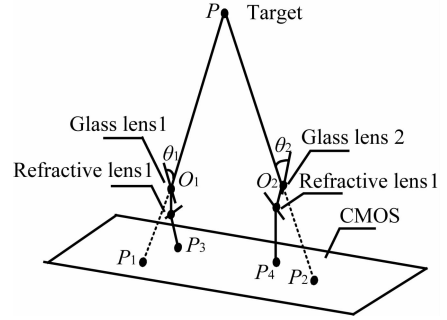


图 6 复眼成像光线轨迹

Fig. 6 Light trace of compound eye imaging

第一部分的线性方程建立过程如下:对于一个目标和对应的单个通道,如图 7 所示,令 $P(X_o, Y_o, Z_o)$ 为透镜中心的三维世界坐标, $P'(X_i, Y_i, Z_i)$ 是空间任一目标点的三维世界坐标。那么连线 PP' 可以用向量 $\mathbf{p}'(\tan \alpha, \tan \beta, 1)$ 来表示。

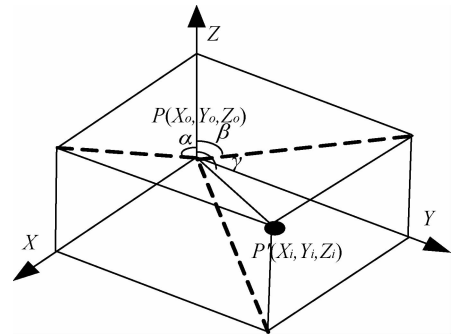


图 7 第一部分的数学模型

Fig. 7 First part of mechanical model

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

$$\frac{X - X_o}{a} = \frac{Y - Y_o}{b} = \frac{Z - Z_o}{c} \quad (1)$$

若各透镜中心的世界坐标和目标点与各透镜间的方向向量 \mathbf{p}' 已知,则可以写出直线的点向式方程:

$$\frac{X - X_{oi}}{\alpha_i} = \frac{Y - Y_{oi}}{b_i} = \frac{Z - Z_{oi}}{c_i} \quad (2)$$

当目标物体同时被 $n(n > 1)$ 个成像通道捕捉时,复眼探测的数学模型可以表示为:

$$\mathbf{MX} = \mathbf{D}, \quad (3)$$

其中:矩阵 \mathbf{M} 、向量 \mathbf{X} 和 \mathbf{D} 分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & C_{11} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{n2} & B_{n2} & C_{n2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{X} = [x, y, z]^T \\ \mathbf{D} = [-D_{11}, -D_{12}, \dots, -D_{n1}, -D_{n2}] \end{cases} \quad (4)$$

解此方程组即可得到目标点的三维坐标。

4 复眼成像系统标定

4.1 标定内容

由于目标定位数学模型中的第一部分是目标到各子眼透镜中心之间的线性部分,可通过线性方法求解;而第二部分是各子眼透镜中心与目标像点之间的关系,由于成像畸变的影响是一种非线性关系,这部分需要通过系统标定才能获得。第一部分的线性关系可以由透镜中心的坐标和表征方向向量的角度 α_i, β_i 求出,其中各子眼透镜中心的世界坐标随着机械加工已经固定,可根据坐标系之间的关系求出。因此,如果任一目标与捕捉到的透镜之间的方向向量 α_i, β_i 已知,则可以根据数学模型的第一部分求出目标点的三维坐标。于是成像系统标定的目的就是找出每个通道入射光线的向量角度与其对应的目标像点之间的关系,为求目标像点对应的入射光线的向量角度作铺垫。

4.2 复眼多通道整体标定

对于单通道而言,若要建立入射光线方向的方向向量与其对应像点之间的关系,可以根据三维坐标已知的目标点求出。即对于任一目标点,如果它的三维坐标已知,则由方程(2)可得到:

$$a_i = c_i \frac{X - X_{oi}}{Z - Z_{oi}}; b_i = c_i \frac{Y - Y_{oi}}{Z - Z_{oi}} \quad (5)$$

继而可由上式求出目标与通道之间在全局坐标系下的方向向量 $\mathbf{p}'\left(\frac{a_i}{c_i}, \frac{b_i}{c_i}, 1\right)$,坐标变换到通道子坐标系后,便可求出与通道对应的向量入射角:

$$\begin{cases} \alpha_i = \arctan \frac{a'_i}{c'_i} \\ \beta_i = \arctan \frac{b'_i}{c'_i} \end{cases} \quad (6)$$

如果这样的目标足够多,其像点能够覆盖整个图像传感器的成像面,则可由上式求出此通道视场内所有入射光线的向量角度与像点之间的对

应关系。同样地,对于任一成像在图像传感器上的像点坐标,都可以根据这种对应关系求出像点所对应的入射光线的方向向量角度。但是如果标定目标很多,将会增加标定的复杂度,同时受目标精度和图像传感器分辨率等的影响,不可能建立起所有的对应关系。因此,可以考虑设定一定间隔并覆盖通道视场角的目标阵列,只对这些目标像点及其对应的向量角度建立标定关系,然后根据建立的标定关系进行插值求取任一像点对应的向量角度。具体的标定步骤和标定结果参考文献[16]。

5 根据像点求通道

由于在普通相机构成的目标定位系统中,透镜和图像传感器具有一一对应的关系,因此如果知道任意目标的像点,就可由该像点和透镜中心坐标很方便地确定出一条直线方程。文献[17]、[18]设计的 TOMBO 复眼成像系统通过中间光隔离层(类似于为每个通道加一个孔径光阑)实现了各通道之间光线的分离,从而避免了串扰,同时将特定通道的像点控制在一定的图像传感器区域,也利于像点与通道之间的识别(见图 8)。

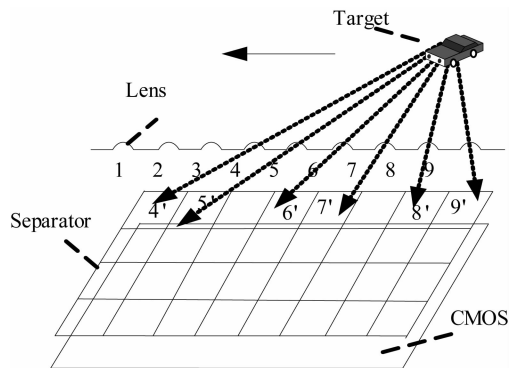


图 8 TOMBO 系统像点与透镜的对应关系

Fig. 8 Corresponding relationship between lenses and their imaging points

为精简结构和减少隔离装置对入射光线的遮挡,本课题设计的复眼定位系统的所有通道共用一个图像传感器成像面;因此对于图 5 上的若干像点,很难判断到底是复眼系统 169 个通道中的哪几个透镜所成的像,从而难以根据像点透镜之间的关系建立目标的数学定位模型。

针对此问题,本文把相邻的 7 个透镜看做一

个簇眼单元,则整个复眼可看做是169个簇眼单元的组合,并且每一个子透镜都可以看做一个簇眼单元的中心透镜。然后,根据像点组合反算目标误差来推算匹配的通道。具体步骤为:

(1) 求出复眼目标所有成像点的中心坐标;

(2) 计算出图像中每一像点与其它像点之间的距离和斜率;

(3) 找出每一像点与其它所有像点距离最小的像点,并定此像点为一簇眼单元的中心像点;

(4) 找出与中心像点距离最近的4个像点,则这5个像点属于一个簇眼单元,然后根据斜率进行编号;

(5) 遍历169个可能的簇眼,对可能的5个通道分别进行两两不同通道组合求出一个目标点的三维坐标,最多得到10个同一目标点的三维坐标。理论上,对同一目标点来说,这10个坐标应该相同,但在实际情况中,由于噪声和系统误差的影响,取这10个坐标的波动误差,并把169种所

有可能中波动误差最小对应的通道定为匹配中心通道,继而求出其它对应的匹配通道,并把匹配簇眼所求出的10个坐标的平均值定义为此测量目标的三维坐标。为使各簇眼所求出的三维坐标一致,本文进行了归一化处理,并定义每个簇眼求出的三维坐标中 x 坐标的波动误差如下式:

$$FE_x = RMS\left(x - \text{mean}\left(\frac{x}{\max(|x|)}\right)\right), \quad (7)$$

其中: $RMS(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |x_i|^2}$, $\text{mean}(x)$ 、 $\max(x)$ 分别为向量 x 的中值、最大值函数。同理可得到 FE_y 、 FE_z 的表达式。

则根据每一个簇眼单元求出的三维坐标的总波动误差为:

$$FE = FE_x + FE_y + FE_z. \quad (8)$$

图9是对一个目标的 N 个成像点进行169个簇眼遍历后得到的误差分布,从图中可以看出,像点与对应透镜匹配时能得到最小的波动误差。

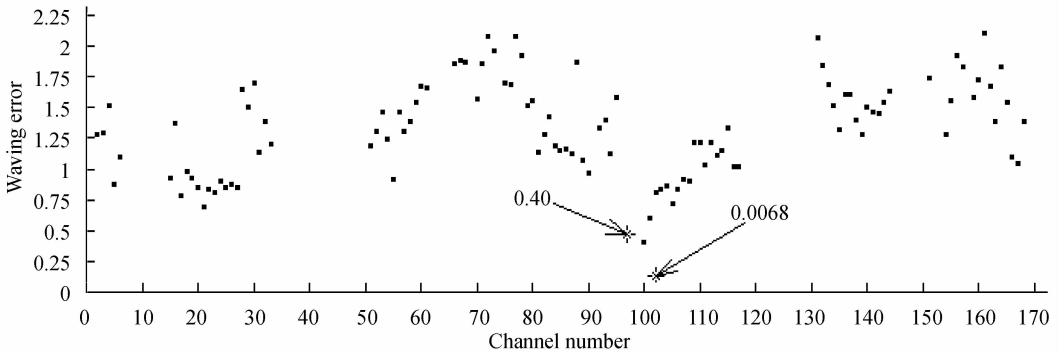


图9 遍历簇眼单元求出的三维坐标波动误差

Fig. 9 Waving errors of three-dimensional coordinates for one target by different cluster eye units

6 三维目标轮廓测量

为测试所设计的复眼系统对大视角物体的测量效果,本文将一仪器外壳放在复眼前方位置(见图10)。使用游标卡尺测量得到此物体的尺寸为 $306.8 \text{ mm} \times 123.60 \text{ mm} \times 438.12 \text{ mm}$ ($L \times W \times H$)。整个面板大约覆盖复眼横向 66° 、纵向 43° 的视场角。

设定测量方案,分别调整激光器位置,将激光器发出的光点打到图中面板上1,2,3,4,5,6,7,8个角点位置,整个测量过程中复眼位置不动,经复眼测量后各点的三维坐标如表1所示。

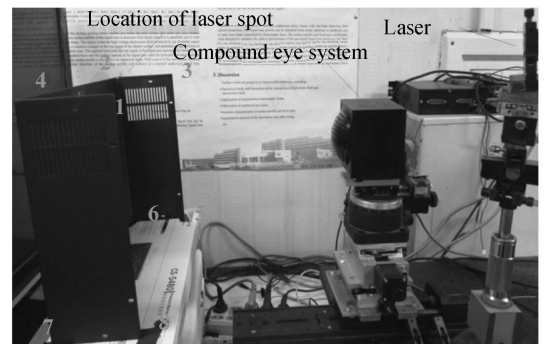


图10 复眼目标定位测量大物体装置

Fig. 10 Measuring devices for large objects with compound eye

表 1 物体角点测量坐标

Tab. 1 Measured coordinates of corner points

Number	(mm)		
	X	Y	Z
1	-237.24	109.38	309.36
2	190.12	84.87	457.36
3	201.51	89.77	336.22
4	-247.15	104.63	433.75
5	184.60	-219.44	321.56
6	176.90	-222.44	444.11
7	-258.86	-202.514	16.66
8	-250.33	-195.72	291.85

根据以上测量结果,分别计算出面板各边的边长如下: $D_{14} = 124.88$ mm, $D_{13} = 440.01$ mm, $D_{42} = 438.35$ mm, $D_{23} = 121.77$ mm, $D_{18} = 305.88$ mm, $D_{47} = 307.84$ mm, $D_{78} = 125.29$ mm, $D_{85} = 436.59$ mm, $D_{56} = 122.83$ mm, $D_{67} = 437.08$ mm, $D_{53} = 310.02$ mm, $D_{26} = 307.88$ mm。对比游标卡尺的测量值可知,使用复眼测量到各点的三维坐标计算出来的各边长误差在 2% 左右,与成像的标定结果一致。根据被测 8 个角点的三维坐标,使用 Matlab 可以画出此物体的立体轮廓图,如图 11 所示。

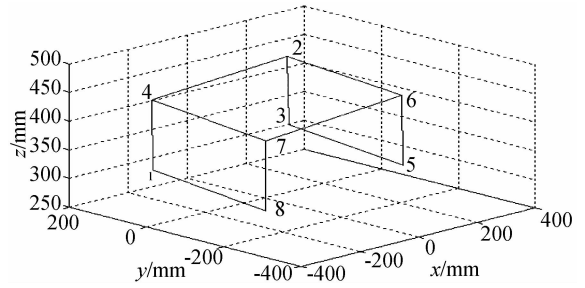


图 11 重构的大视角物体轮廓图

Fig. 11 Reconstructed contour of objects with large field of view

7 结 论

本文根据现代视觉定位的发展方向,研制出了一种用于大视场目标定位的复眼装置,该复眼装置采用多透镜共同成像于一个图像传感器的成像方式,具有工艺结构简单、体积小、可靠性高等特点。通过数据采集、成像系统标定以及像点匹配算法的研究,实现了目标的三维定位。最后,利用该装置对一个大视角面板的各个角点进行了测量,重构出了被测物体的三维轮廓。实验结果证明:所设计的复眼系统是可行的,初步标定后系统的测量精度能达到 2%,满足大视场的要求。

参考文献:

[1] 李盾. 空间预警系统对目标的定位与预报[D]. 长沙:国防科学技术大学,2001.

LI D. *Location and prediction for target in the warning system*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001. (in Chinese)

[2] BESL P J, JAIN R C. Three dimensional object recognition [J]. *ACM Comput. Surveys*, 1985, 17 (1): 75-145.

[3] SOEEN L, 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.

[4] 韦毅, 杨万海, 李红艳. 红外三维定位精度分析[J]. *红外*, 2002, 2: 11-14.

WEI Y, YANG W H, LI H Y. Accuracy analysis of

3D infrared passive location [J]. *Infrared*, 2002, 2: 11-14. (in Chinese)

[5] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2000.

JIA Y D. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)

[6] JIRAW I R, PRAKONW I S, CECELIA F, et al.. Visual odometer for pedestrian navigation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, 52(4): 1166-1173.

[7] WEI P, ZEIDLER J, WU W. Analysis of multiframe target detection using pixel statistics [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System*, 1995, 31(1): 238-247.

[8] MATHIES L, BROWN E. Machine vision for obstacle detection and ordnance recognition [C]. *Proceedings of Annual meeting of the Association for Unmanned Vehicle Systems*, 1996: 1-9.

[9] LAND M F, STAVENGA D G, HARDIE R C, et

- al.. Variations in the structure and design of compound eyes [J]. *In Facets Vision, New York: Springer Verlag*, 1989: 90-111.
- [10] JUSTH E W, KRISHNAPRASAD P S. Steering laws for motion camouflage [C]. *Proceeding Royal Soc. A*, 2006, 462:3629-3643.
- [11] HORNSEY R, THOMAS P, WONG W, *et al.*. Electronic compound-eye image sensor: construction and calibration [J]. *SPIE*, 2004, 5301:13-24.
- [12] 张红鑫, 卢振武, 李凤有, 等. 曲面复眼成像系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 346-350.
- ZHANG H X, LU ZH W, LI F Y, *et al.*. Study on curved compound eye imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 346-350. (in Chinese)
- [13] 金伟其, 林青, 袁溯, 等. 多孔径仿生复眼成像系统技术进展综述[J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(6): 9-13.
- JIN W Q, LIN Q, QIU S, *et al.*. Progress of multiaperture bionic compound eye imaging systems [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(6): 9-13. (in Chinese)
- [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] 郭方, 王克逸, 曹兆楼, 等. 基于目标定位与跟踪的簇眼结构和图像采集系统设计[J]. *航空兵器*, 2011, 2: 47-51.
- GUO F, WANG K Y, CAO ZH L, *et al.*. Design of cluster eyes and image collection system based on target positioning and target tracking [J]. *Aero Weaponry*, 2011, 2: 47-51. (in Chinese)
- [16] 郭方, 王克逸, 闫佩正. 基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.
- GUO F, WANG K Y, YAN P ZH, *et al.*. Calibration of compound eye system for target positioning with large field of view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 913-920. (in Chinese)
- [17] TANIDA J, KUMAGAI T, YAMADA K, *et al.*. Thin observation module by bound optics (TOMBO): an optoelectronic image capturing system [J]. *SPIE*, 2000, 4089: 1030-1036.
- [18] TANIDA J, KITAMURA Y, YAMADA K, *et al.*. Compact image capturing system based on compound imaging and digital reconstruction [J]. *SPIE*, 2001, 4455: 34-41.

作者简介:



郭方(1977—),男,安徽阜阳人,讲师,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



王克逸(1962—),男,河北保定人,教授,博士生导师,1995年于中国科学院等离子体物理所获工学博士学位,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