

doi: 10.3788/gzxb20164505.0512003

基于大视场人工复眼定位技术

郭书基^{1,2}, 史立芳², 曹阿秀², 吴向东¹, 邓启凌²

(1 西南交通大学 机械工程学院 机电测控系, 成都 610000)

(2 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘 要:针对大视场目标探测提出了一种基于人工复眼大视场定位方法. 通过分析子眼视场角与总视场角之间的关系, 并结合多目视觉定位对子眼排布方式的要求, 研究了包含多个子眼的人工复眼结构设计方法. 通过分析子眼图像与三维空间映射关系, 对二维图像进行裁剪并映射于三维立体空间, 实现了二维子眼图像在三维空间的大视场拼接. 利用子眼图像坐标、空间三维坐标及系统参数间的关系, 建立了空间点多目定位数学模型, 并编制目标定位算法. 制备了包含 19 个子眼可实现 120°大视场角的样机, 通过张正友标定法获得系统参数, 并进行目标定位实验. 实验结果表明, 使用设计的人工复眼大视场成像系统对 5.35m 处目标进行探测, 定位误差为 0.19%.

关键词:光学设计与制备; 三维定位; 机器视觉; 图像处理; 多通道成像; 复眼; 大视场

中图分类号: Q692; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)05-0512003-6

Study of Large Field of View Compound-eye Orientation Technology

GUO Shu-ji^{1,2}, SHI Li-fang², CAO A-xiu², WU Xiang-dong¹, DENG Qi-ling²

(1 College of Mechanical Engineering, South-west Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

(2 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Aiming at the target detection in a large field of view, a localization method was presented based on the artificial compound-eye. By analyzing the relationship between the sub eye Field of View angle and the total Field of View angle, combining with the consideration about the sub eye arrangement of multi-vision positioning, the designed method of artificial compound eye structure was studied which contains multiple sub eyes and can realize the detection in a large field of view. To analyze the three-dimensional space mapping law, the two dimensional images were cropped and mapped to 3D space, and the large field of view in 3D space was realized. To analyze the relationship between the sub image coordinates and the three-dimensional coordinates, the mathematical model of multi vision object location was established and the target location algorithm was compiled. A prototype was manufactured which contains of 19 sub eyes and can achieve 120 degree angle of large field of view, and the system parameters were obtained by Zhang Zheng-you calibration method. Then we carried out the 3D localization experiments. Experimental results show that the positioning error is 0.19% when we use the artificial compound eye imaging system to detect the target in 5.35 m.

Key words: Optical design and fabrication; Orientation; Machine vision; Image processing; Multiple imaging; Compound eye; Large field of view

OCIS Codes: 120.6085; 150.0155; 150.6910; 100.3010; 100.3020

0 引言

自然界中很多昆虫是靠一对复眼作为视觉感知器官, 由于子眼通常是排列在曲面上的, 每个子眼的光轴朝向不同方向, 且相邻子眼之间存在视场重叠区域, 昆

虫复眼的这些结构特点引起科研人员的广泛关注. 国内外很多研究小组对人工复眼结构的设计和制备方法进行了研究.

日本 Jun Tanida 研究小组提出了 TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics) 人工复眼系统,

基金项目:国家自然科学基金项目 (No. 61505214), 中科院支撑项目 (No. A11K030), 西部之光和中国科学院青年创新促进会资助

第一作者:郭书基 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光机电一体化. Email: duyao1002@foxmail.com

导师 (通讯作者):吴向东 (1963-), 男, 博士, 主要研究方向为液压元件及流体控制. Email: wxd99@sina.com

收稿日期:2015-07-27; **录用日期:**2016-02-18

并将其成功应用于指纹识别中^[1-3],由于该系统采用的是平面复眼结构,因而视场角受到了一定限制.德国JACQUES带领的小组采用微透镜阵列来模拟昆虫复眼,成功研制了平面型并列复眼以及球面复眼结构^[4-5],但由于制造工艺的限制,使得所成的大视场图像具有较多死区,且成像效果不理想.Nature 报导了一款由多国科学家合作研制的人工复眼相机^[6],该相机采用弹性材料原件,具有小型化、轻量化的特点,但是由于其微透镜的成像分辨率不高,成像效果仍不理想.南京航空航天大学也对仿生复眼视觉系统进行了相关研究^[7],采用云台及支臂来安装和固定各个子眼成像通道,这种方案要求子眼数量不能太多,否则整体系统会变得非常庞大.中国科学技术大学的研究小组对复眼结构的理论、模型设计方法及潜在的应用也开展了相关研究^[8-10].

近年来,本课题组也针对人工复眼结构开展了一系列研究,史立芳等给出了人工复眼结构单镜头的设计方法以及镜头阵列的排布准则^[11-12].曹阿秀等提出了一种切割-旋转-映射的图像处理算法来实现多通道图像的大视场拼接^[13-14].刘艳等提出了一种基于平面阵列复眼的三维定位系统^[15-16],完成了使用人工复眼进行三维定位的测试实验.

本文在大视场人工复眼结构设计和制备的基础上,进一步挖掘复眼结构在三维定位方面的优势,开展了曲面复眼结构中的定位技术研究,突破了该三维立体空间定位技术.

1 人工复眼结构工作原理

1.1 大视场成像原理

在复眼系统中,子眼通常排布在曲面上,因而各成像通道的光轴朝向不同的方向,可以探测到远大于单个子眼的视场范围.图1为包含3个子眼的复眼系统, θ 为单个子眼的视场角,3个子眼的视场具有相应的重叠区域,总视场角远大于单个子眼视场角.用Rhinceros软件建立各子眼通道3D模型,在3D模型

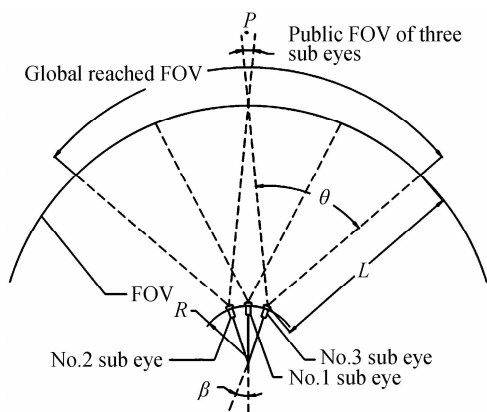


图1 大视场复眼成像原理

Fig.1 The imaging principle of the large FOV compound eye

中,确定各子眼通道视场交点坐标,连接交点坐标确定各子眼视场重叠区域.将各子眼通道所成的二维图像映射到三维空间,去除掉视场重叠区域中的冗余图像,对非重叠视场中的图像进行拼接,获得大视场图像,可以实现远大于单个子眼的视场角.

1.2 定位原理

复眼结构为多通道成像系统,可同时从多个角度获得关于目标物的信息,为大视场目标三维信息的提取提供可行性方案.

如图2, Pic₁ 为假想的成像平面,以其几何中心 o 点为原点建立图像坐标系,平行于图像边界的 x、y 轴分别表示图像坐标系横、纵坐标轴.以成像平面的左上角为原点,建立像素坐标系,用 u、v 分别表示像素坐标系上横纵坐标轴,则点 o 的像素坐标为(u₀, v₀).以相机光心 O_c 为坐标原点建立相机坐标系,其坐标轴记为 X_c、Y_c、Z_c, X_c、Y_c 分别与图像坐标系横、纵坐标轴平行, Z_c 轴垂直于图像平面.以同样的方式定义 Pic₂、Pic₃ 图像平面及其相应坐标.此外,世界坐标系坐标轴分别记为 X_w、Y_w、Z_w, 其坐标原点为 O_w.

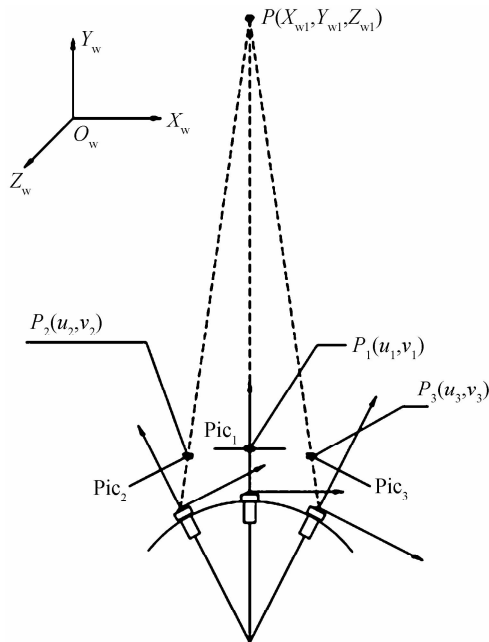


图2 复眼三维定位原理

Fig.2 The 3D positioning principle of compound-eye

设 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 为空间一点,其在图像上像点为 $p(u, v)$,根据单个子眼小孔成像直线性模型^[17],有

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{X}_w = \mathbf{M} \mathbf{X}_w \quad (1)$$

式(1)即建立了一条通过 p 、 P 两点的直线,其中, $\alpha_x = f/dx, \alpha_y = f/dy$; \mathbf{M} 为 3×4 矩阵; \mathbf{M}_1 与 $\alpha_x, \alpha_y, u_0,$

v_0 有关,表征了相机的内部结构信息,因此称为摄像机的内部参数; M_0 反映了像机坐标系与世界坐标系之间位信息,因此称为像机的外部参数。

由于式(1)为直线方程,因此又可以将其变型为

$$\begin{cases} A_{i1}x + B_{i1}y + C_{i1}z + D_{i1} = 0 \\ A_{i2}x + B_{i2}y + C_{i2}z + D_{i2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

从图2中可以看出,当P点被3个通道同时捕捉到时,3条直线的理论交点即为所求的P点的三维坐标。

一般地,当目标被 $n(n>1)$ 个通道同时捕捉到时,则多个通道可以建立起联合方程组

$$MX = D \quad (3)$$

式中,矩阵M、向量X和向量D分别为

$$M = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & C_{11} \\ A_{12} & B_{12} & C_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & B_{n1} & C_{n1} \\ A_{n2} & B_{n2} & C_{n2} \end{bmatrix}$$

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

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

式(3)为一超定性方程组,一般情况下,超定性方程组是没有精确解的,所以绝大多数下只能求取近似解。目前,最小二乘法是求解该式最普遍采用的一种方法。作为一种数学优化求解方法的最小二乘法是通过最小化误差平方和的标准得到一组与问题解最佳函数匹配的数据。最小二乘法可以根据误差最小的准则将超正定方程转化为未知数等于方程个数的方程组,从而进一步求出确定的未知参数。

设存在矩阵T,满足 $MTV=0$,令式(3)的残余误差 $V=D-MX$,则

$$MTD - MTMX = 0$$

整理得到

$$(MTM)X = MTD$$

若将MTM用C表示,则上式又可以写成 $CX = MTD$ 。当M的秩等于3时,矩阵C满秩,则有

$$X = C^{-1}MTD \quad (4)$$

令 $MT = A^T$,于是未知数X唯一解可表示为

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

由式(4)可知,该多通道目标定位模型可以求得最优解。

2 人工复眼系统设计与制备

2.1 人工复眼结构设计

本系统的提出是为了实现大视场目标三维探测,主要是通过从图像中提取信息来实现。因此,确定子眼的排布特征以获取所需要的图像信息至关重要。

子眼的排布特征需满足两方面的要求,大视场拼接要求相邻子眼重叠区域尽量少,以减少需要裁减掉

的冗余区域,而三维目标定位则需要相邻子眼具有足够大的公共区域,从而提高探测精度,减少探测盲区。因此,子眼排列紧密度要适度,在满足定位要求重叠区域的前提下,视场可以覆盖的区域越大越好,即子眼的排列方式主要由相邻子眼视场的相互关系来确定。

首先,在Rhino软件中建立子眼排布三维模型,由于选择的透镜视场角为 40° ,按单个子眼 40° 的视场角建立子眼视场三维模型,判断对应的子眼视场是否满足前述视场排布原则,通过不断调整,建立了如图3的子眼排布方式。子眼分3层进行排布,各层分别均有1、6、12个透镜。

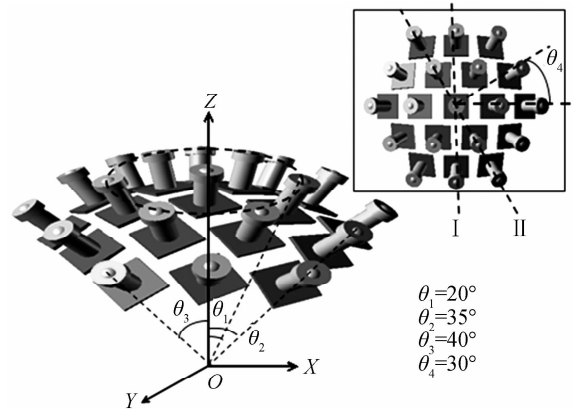


图3 子眼排布方式

Fig. 3 Sub eyes arrangement

从图3可以看出,该子眼排布方式在I方向上实现的视场角最大,在II方向上实现的视场角最小。设单个子眼的视场角为 θ ,则在I、II方向上可实现的理论视场角分别为

$$FOV_I = 2\theta_3 + \theta$$

$$FOV_{II} = 2\theta_2 + \theta \quad (6)$$

带入数值运算后,得到 FOV_I 为 120° , FOV_{II} 为 110° 。

确定了子眼排布方式后,在Rhino软件中建立各子眼成像通道所对应的视场三维模型,俯视图如图4,分别对各层视场以0、1、2进行编号,以2-F为例,表示第2层F号视场。

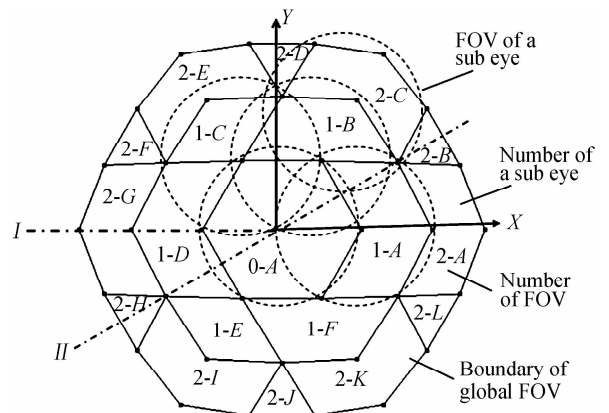


图4 子眼视场排布俯视图

Fig. 4 The sub eyes field arrangement plan

从图 4 中可以看出,对各个子眼成像通道视场进行拼接时需要裁减掉一部分视场冗余区域,使得获得的总视场角小于理论值.在视场三维模型中对总视场角进行测量,得到总视场在 I 方向最大,为 119.674°,在 II 方向最小,为 106.397°.同时也可以看出,相邻子眼具有足够的视场重叠区域,三维空间中的目标至少可以同时被 2 个镜头拍摄到,保证了该视场排布方式可以实现目标三维坐标的精确求解.

2.2 人工复眼结构的制备

为了对仿生复眼大视场定位系统进行验证,实际制备的样机如图 5,样机由镜头、支撑体、摄像头单板(包含 Complementary Metal Oxide Semiconductor 图像传感器及其外围电路)、基于 FPGA (Field Programmable Gate Array) 的图像采集单板、设备背板组成.其中,单个镜头垂直视场角(最小视场角)为 40°,焦距为 3.6 mm,CMOS 靶面成像区域尺寸为 3 625 μm × 2 709 μm,单个像素实际大小为 1.75 μm × 1.75 μm,有效像素数为 2 048 × 1 536. CMOS 外围电路的作用是负责对图像数据的光学采集,包括图像同步拍摄,亮度、白平衡一致等;FPGA 采集单板的作用为控制和获取数据,实现所有通道图像的同时采集、传输;设备背板负责,所有子眼透镜及其 CMOS 外围电路板都需要安装在支撑体上,支撑体的球面半径决定了子眼的排布半径,考虑到安装要求,支撑体球面半径设计为 9 cm.

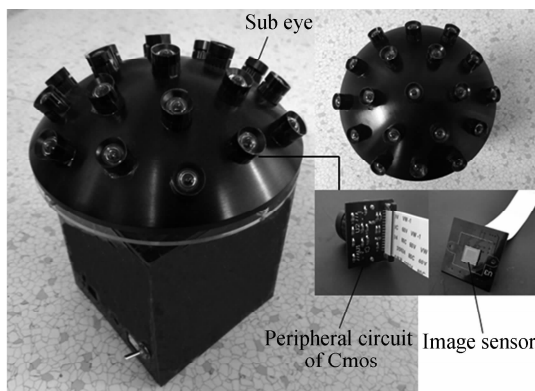


图 5 人工复眼原型样机

Fig. 5 Artificial compound-eye prototype

3 大视场定位实验及分析

3.1 人工复眼结构的标定

无论是大视场图像拼接还是三维定位算法,都需要知道各个子眼 CMOS 靶面之间精确的相对位置关系,而且在线性模型中,是把光学成像系统中的“镜头”看做是一个小孔,但是实际应用中的镜头都是由若干块具有一定厚度和面积的透镜组成的,不可避免地会存在各种偏差,如透镜像差以及透镜光轴与成像面之间的不垂直等,从而使得投影成像过程会发生一定的畸变,因此,为了准确地获取镜头内外参数,并建立物

像之间的非线性数学模型,需要对复眼系统进行标定.

以张正友标定法^[18]对各个子眼通道进行标定,选用标准棋盘格标定板,其标定精度为 0.1 mm,将棋盘格标定板放置于合适的位置,既要能够保证获得清晰的标定图像以提高角点提取精度,同时又要保证标定板位于所要标定的子眼视场公共区域内,以 10、14 号两个镜头标定为例,如图 6,将棋盘格标定板放置于距离复眼大视场定位装置约 0.45 m 处,并将其变换不同的位置,同时使用 10 号镜头及 14 号镜头对标定板进行拍摄,获得不低于 12 对(本文拍摄 20 对)图像对.

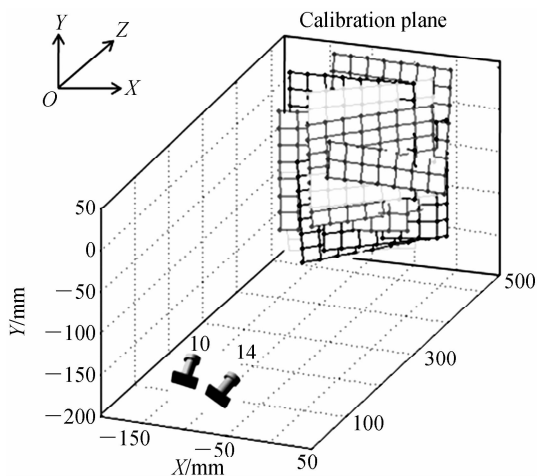


图 6 复眼参数标定方法

Fig. 6 Calibration method of compound-eye

根据欧氏变换法则,空间两坐标系之间的位置关系可以用旋转向量 R 及平移向量 T 来进行表征.对获得的图像对进行角点提取,通过标定板上各角点在两台摄像机中的像素坐标建立两台摄像位置之间的约束关系,即可求得向量 R, T .

表 1 为以 10 号子眼为基准参考,使用 Matlab 标定工具箱^[19]标定获得的旋转向量 R (3 × 3 向量,由于旋转向量元素的对称性,可等价于 3 × 1 向量 om 以减少向量储存空间)及平移向量 T .

表 1 部分复眼标定参数

Talbe 1 Calibration result of compound-eye

Numbers	om	T
4	-0.282 3, 0.246 6, 0.164 4	20.806 4, 28.941 5, -9.928
5	0.2161, -0.2804, -0.1156	-29.0137, -21.8292, -5.2872
7	0.1329, 0.3456, -0.2311	31.2057, -18.1987, -6.0521
12	0.3438, 0.0437, -0.2046	1.0194, -36.4496, -5.1447
14	-0.1818, -0.3310, -0.3200	-29.4101, 21.2274, -6.3524
15	-0.3762, 0.0046, -0.4818	9.1976, 34.7953, -7.7190

根据标定结果,确立了复眼系统各子眼透镜拍摄的图像间的相互位置关系。

3.2 大视场成像实验

基于子眼成像通道的旋转角度和排布方式,计算出相邻视场之间的交点坐标,根据所有子眼镜头视场相交所成的交点的三维空间坐标,编写程序对所有通道的原始图像进行切割,保留对应通道多边形内的场景,去除边缘冗余部分.然后将切割后的图像进行旋转并将旋转后的图像映射到相应位置完成大视场拼接,具体步骤为

- 1) 根据组成曲面复眼成像系统中各子眼图像采集通道的排布特征,确定视场交点坐标;
- 2) 连接同一视场内交点,确定图像裁减边界;
- 3) 获取各个图像采集通道的原始图像;
- 4) 对各个图像采集通道获得图像进行旋转,将其映射于相应的成像通道;
- 5) 根据裁减边界,对原始图像进行切割;
- 6) 对拼接缝进行处理,完成图像拼接。

拼接之后的图像如图 7. 从图中可以看出,单个子眼视场范围有限,而复眼可以实现的视场角则远大于单个子眼成像通道可以探测到的区域。

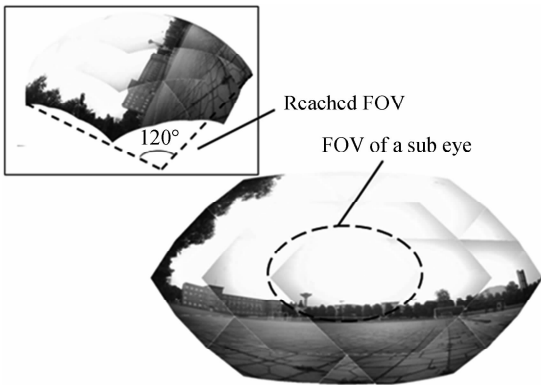


图 7 人工复眼大视场图像

Fig. 7 Large FOV images of artificial compound-eye

3.3 定位实验

用制作的样机对位于 5 350 mm 处墙上绘制的 9 点进行三维定位,9 点直径为 30 mm,横向点间距 L_1 为 65 mm,纵向点间距 L_2 为 40 mm. 对 9 点进行编号,如图 8,利用仿生复眼大视场定位系统对 9 点进行拍摄,得到 19 幅独立的图像,在拍摄到 9 点图像的照片中提取出 9 点中心在各幅图像中的像素坐标,以图像左上角为坐标原点,图像边界为横纵轴 u 、 v . 以图 4 中 0-A 视场对应的摄像头光心为坐标原点 $(0,0,0)$,摄像头靶面的横纵轴为 X 、 Y 轴方向,垂直于靶面向外为 Z 轴方向,建立空间直角坐标系. 根据 1.2 节中所述人工复眼三维定位原理,在 MATLAB 软件中建立计算模型,求得 9 个目标点的三维空间坐标。

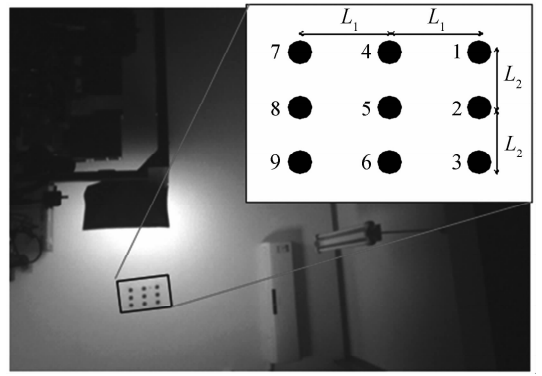


图 8 点距测量实验示意图

Fig. 8 Distance measured experiment of points

为便于统计误差,选择图中 L_1 、 L_2 及 9 点到样机的 Z 向距离来对探测结果进行评价. 根据 9 点中心三维坐标计算 L_1 、 L_2 实际距离,并将其与理论值进行对比. 图 9 为 L_1 、 L_2 的理论值与测量值的对比图,从图中可以看出, L_1 、 L_2 的测量值都围绕其理论值进行波动,但波动幅度非常小,该实验结果表明所制作的复眼定位样机能够实现高精度的三维坐标测量。

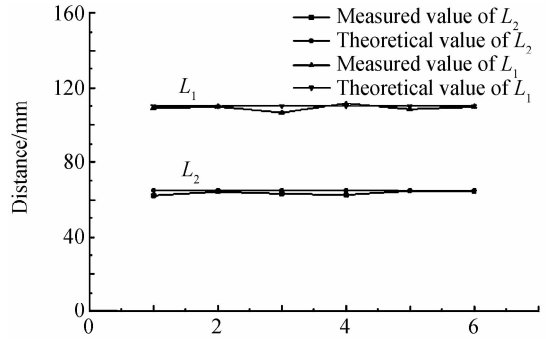


图 9 L_1 、 L_2 理论值及测量值对比

Fig. 9 Theoretical and measured value comparison of L_1 and L_2

表 2 为 9 点测量实验中测得的 9 点中心 Z 坐标的测量值及相对误差值, Z 坐标理论值为 5 350 mm,从表中可以看出,测量值最大相对误差为 1.03%,而最小测量相对误差则可以达到 0.19%。

表 2 9 点 Z 坐标测量结果

Table 2 Measured result of 9 points in Z axis

Serial number	Measured value of Z coordinate/mm	Relative error
1	5 302.5	-0.89%
2	5 330.0	-0.37%
3	5 380.1	0.56%
4	5 331.1	-0.35%
5	5 405.0	1.03%
6	5 340.0	-0.19%
7	5 323.7	-0.49%
8	5 387.1	0.69%
9	5 383.9	0.63%

4 结论

本文通过分析人工复眼结构成像机制,研究人工复眼结构大视场三维定位原理,提出了一种基于人工复眼的大视场成像及三维定位方法,并通过数据采集、系统标定获得系统参数,在此基础上,完成了大视场图像拼接并实现了基于人工复眼成像的目标三维定位.此系统采用球面人工复眼作为成像结构,微型摄像机作为子眼,整体尺寸不超过 20cm,具有工艺简单、可靠性高、体积小等特点.最后,设计并制备了原理样机,利用该装置开展大视场成像实验及三维定位测试实验.实验表明,此系统能够实现清晰的大视场成像,同时满足高精度定位及小型化的要求.通过优化系统标定方法及提高目标物像素坐标提取精度,可以有效提高探测精度.

参考文献

- [1] TANIDA J, KUMAGAI T, YAMADA K, *et al.* Thin observation module by bound optics (TOMBO): concept and experimental verification[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(11): 1806-1813.
- [2] TANIDA J, KUMAGAI T, YAMADA K, *et al.* Compact image capturing system based on compound imaging and digital reconstruction[C]. International symposium on Optical Science and Technology. International Society for Optics and Photonics, 2001: 34-41.
- [3] SHOGENI R, KUMAGAI T, YAMADA K, *et al.* Bimodal fingerprint capturing system based on compound-eye imaging module[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(6): 1355-1359.
- [4] DUPARRE J, SCHREIBER P, MATTHES A, *et al.* Microoptical telescope compound eye [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(3): 889-903.
- [5] RADTKE D, DUPARRE J, ZEITNER U D, *et al.* Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(6): 3067-3077.
- [6] SONG Y M, XIE Y, MALYARCHUK V, *et al.* Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye [J]. *Nature*, 2013, **497**(7447): 95-99.
- [7] CAI Meng-ying, XU Gui-li. Fast bionic image mosaic method on large field of view [J]. *Transducer and Micro System Technologies*, 2007, **26**(12): 82-84.
蔡梦颖, 徐贵力. 仿蝇复眼视觉系统中大视场图像的拼接[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(12): 82-84.
- [8] GUO Fang, WANG Ke-yi, YAN Pei-zheng, *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.

- [9] GUO Fang, ZHANG Hao, WANG Ke-yi, *et al.* Point detection and positioning system of the target based on surface cluster eyes[C]. SPIE, 2010, **7656**: 765663(2010).
- [10] MA Meng-chao, GUO Fang, CHAO Zhao-lou, *et al.* Development of an artificial compound eye system for three dimensional object detection[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(6): 1806-1813.
- [11] SHI Li-fang, CAO A-xiu, LIU Yan, *et al.* Design and experiments of artificial compound eye with large view field [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, **40**(7): 27-33.
史立芳, 曹阿秀, 刘艳, 等. 大视场人工复眼结构设计方法与实验[J]. *光电工程*, 2013, **40**(7): 27-33.
- [12] SHI Li-fang, YE Yu-tang, DENG Qi-ling, *et al.* Method to fabricate artificial compound eye [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(9): 2462-2466.
史立芳, 叶玉堂, 邓启凌, 等. 制备人工复眼结构的方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(9): 2462-2466.
- [13] CAO A-xiu, SHI Li-fang, SHI Rui-ying, *et al.* Image process technique used in a large FOV compound eye imaging system[C]. SPIE, 2012, **8558**: 1-8.
- [14] CAO A-xiu, SHI Li-fang, SHI Rui-ying, *et al.* Image processing algorithm study of large FOV compound eye structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 1-6.
曹阿秀, 史立芳, 石瑞英, 等. 大视场复眼结构图像处理算法研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1): 1-6.
- [15] LIU Yan, SHI Li-fang, SHI Rui-ying, *et al.* An artificial compound eye system for large field imaging processing[C]. SPIE, 2012, **8558**: 1-6.
- [16] LIU Yan, GOU Jian, YIN Shao-yun, *et al.* Design of three-dimensional orientation system based on artificial compound eye imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, **41**(5): 89-94.
刘艳, 苟健, 尹韶云, 等. 人工复眼成像三维定位系统设计[J]. *光电工程*, 2013, **41**(5): 89-94.
- [17] MA Song-de, ZHANG Zheng-you. Computer vision, the theory and algorithm[M]. Beijing, Science Press. 1998: 72-78.
马颂德, 张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础[M], 北京: 科学出版社. 1998: 72-78.
- [18] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [19] BOUGUET J Y. Camera calibration toolbox for MATLAB, (2003), retrieved. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.