

文章编号 1004-924X(2011)05-0992-06

仿生复眼接收系统设计与实验

谭雪春*, 武志超, 梁 柱

(长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要:以生物视觉成像和目标识别为研究背景,深入研究了光学复眼的结构与拼接以及基于光纤耦合的光信号接收成像技术,并设计了一种可应用于凝视激光雷达的新型光学复眼接收系统。通过模仿昆虫复眼结构形式,该系统由 16 个透镜阵列构成,全视场角为 2° 。利用 Zemax 软件完成了光学系统设计,结合光纤耦合技术接收光信号,对复眼探测结果进行了实验研究和分析。结果表明,该接收系统能够准确地反映探测目标轮廓,探测距离可达 200 m 以上,在实验室获得了 20 frame/s 的距离图像,像点点阵间距为 $1.72 \text{ m} \times 1.72 \text{ m}$ 。实验结果验证了该接收系统的合理性,表明该系统可以满足导弹末制导使用或是低空飞行器下视地形匹配。

关键词:光学复眼;距离成像;接收系统

中图分类号: TN958.98; Q692 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.0992

Design and experiment of artificial compound eye receiving system

TAN Xue-chun, WU Zhi-chao, LIANG Zhu

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: tanxc21@126.com

Abstract: On the basis of biological visual systems and object recognition technologies, several key technologies of artificial compound eyes, including its structure, splicing, fiber coupling and optical signal receiving technique were studied and a bionic compound eye receiving system was designed for staring laser radars. By imitating the structures and shapes of compound eyes of insects, the system consists of 16 lens arrays, and its whole field angle is 2° . The optical system was designed by the Zemax software and optical signals were received by fiber coupling technology. The detection results were studied experimentally, and it shows that this receiving system can well reflect the contour of a detecting target, and the detection range is more than 200 m. On the experimental setup, a range image with 20 frames is obtained, and the pixel space is $1.72 \text{ m} \times 1.72 \text{ m}$. Obtained results verify the feasibility of proposed system and indicate that the system can be used in the missile end-guiding and the topographic matching of aircrafts in low altitudes.

Key words: optical compound eye; range imaging; receiving system

收稿日期: 2010-07-23; 修订日期: 2010-10-27.

基金项目: 吉林省教育厅基金资助项目 (No. 2009JYT08)

1 引言

通常昆虫复眼由几十个到几千个甚至几万个小眼组成,具有体积小、质量轻、灵敏度高、视场开阔,对移动的物体反应敏感等显著特点^[1-2]。现在人们已经从初期的生物学角度转变为光学角度来认识复眼及其应用。国际上对昆虫复眼的视觉机理和人工仿生技术非常重视,许多科学家通过模仿昆虫复眼的结构与功能,研制出了诸多人工复眼光学系统,近些年复眼技术已广泛应用于模式识别、3D成像、导航制导等领域^[3-7]。

受昆虫复眼启发^[8-10],本文设计了一种新型光学探测接收系统,其关键单元是模仿昆虫复眼结构而设计的阵列透镜,也称为光学复眼,其机构类似于昆虫复眼的最小单元。该复眼由16个透镜组合拼接而成,利用Zemax软件对其进行相应的光学系统设计,并结合光纤耦合技术构成新型接收系统,很好地实现了对光信号的接收。本文介绍了该系统的总体设计方案,并进行了深入的实验研究,详尽分析了实验结果,从而验证了该接收系统的合理性。

2 光学复眼结构设计

本文所设计的复眼系统模拟了激光雷达接收系统中的一部分,其原理是当激光器发射出的激光打到探测目标后,由光学复眼接收回波信号,然后会聚耦合到光纤中,再入射于光电探测器,最后利用信息处理技术对光纤输出的回波信号进行距离成像,从而得到探测目标的轮廓特征。该光学复眼系统由16个透镜组构成,作者通过计算单个透镜组(相当于昆虫单眼)的设计参数,并在单眼基础上对其进行视场拼接来实现复眼系统接收。

2.1 单眼设计

对于激光制导雷达,多要求导弹上的接收机体积小、重量轻,但对成像像质要求不高,因此,本文设计的光学单眼采用两个透镜构成的透射式接收光学系统。

实验采用的光纤直径为0.6 mm,数值孔径为0.22,每个单眼的视场角为0.5°。根据设计参

数要求,由数值孔径公式:

$$NA = n \sin \theta, \quad (1)$$

可得 $\theta = 12.7^\circ$ (取空气中折射率 $n=1$),光纤的最大入射角为 12.7° 。实验中将光纤接收面置于单眼透镜的焦点上进行接收,根据透镜的等效焦距与视场角关系式:

$$\tan \omega = \frac{y}{f'}, \quad (2)$$

把最大光斑半径和视场半角代入式(2)可得最大焦距为 $f' = 68.7 \text{ mm}$,式中 y 为焦点处光斑半径, ω 为视场半角, f' 为透镜的等效焦距。再根据式(3):

$$\tan \theta = \frac{D}{2f'}, \quad (3)$$

把最大焦距 $f' = 68.7 \text{ mm}$ 代入式中,可得最大入瞳直径为 $D = 30.9 \text{ mm}$,式中 D 代表入瞳直径。这样,就得到了单眼透镜的相关参数。依据这些参数利用Zemax软件进行光学系统设计,即可满足光纤端面直径和数值孔径的要求。本文设计的透镜组材料为K9玻璃,其焦距为62.8 mm,视场角为 0.5° ,通光孔径为30 mm,最小的会聚光斑半径为0.297 mm,这些参数很好地满足了单眼系统的设计要求,可以用于模拟凝视激光雷达的光学接收系统。

2.2 复眼拼接组合

为了实现大视场拼接,在上述设计好的单眼透镜组基础上,对整体透镜阵列进行了组装。本文主要设计 4×4 的透镜阵列,在拼接过程中,须要保证光学系统能够最大面积地接收到光信号,同时,每个透镜对应的视场都是相互独立的,没有重叠区域。由于视场角较小,本文采用了直接拼接的方法。光学单眼物镜的直径为30 mm,进行复眼设计时,将物镜切割成边长为21 mm的正方形,并把切割好的16个方镜分为4组,进行直接拼接,相邻单眼视场的重叠区域可以通过设计特殊的机械结构来做相应的调整。图1为相邻单眼的夹角示意图,为保持每个物镜视场角为 0.5° ,图中 α 角为 0.25° 。

目镜的视场分离通过机械设计来完成,在制作目镜镜筒所放的小孔时,每个孔都如图1所示设计,以便放入各个目镜时,其视场自然彼此分

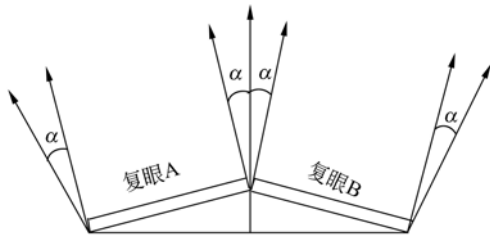


图 1 相邻单眼夹角示意图

Fig. 1 Diagram of angles between neighboring compound eyes

离,即调节方形物镜与目镜同心就可以使视场分离。

2.3 光纤耦合

由于复眼透镜和探测器均具有一定体积,而系统空间有限,不可能将所有雪崩光电二极管(APD)探测器都直接置于复眼透镜的焦点处。因此,实验中采用模拟生物神经的方法,将单根光纤一端用机械装置固定于单个透镜的成像焦点,另一端连接在 APD 探测器上来实现光纤耦合光路精确对准。根据耦合条件,使用数值孔径 $NA = 0.22$,纤芯直径 $\Phi = 0.6 \text{ mm}$,折射率 $n_1 = 1.471$, $n_2 = 1.457$ 的阶跃型石英光纤作为耦合用光纤。为了使系统便于更换光纤,光纤与耦合器的连接主要以插接式为主,以方便光纤连接头的拆卸。实验中聚焦后的激光光斑和光纤纤芯都很小(约为 0.5 mm),采用精密加工可调节的套筒装置,实现了聚焦光斑和光纤的精密对准,图 2 为耦合器结构实物图。



图 2 耦合器实物图

Fig. 2 Real diagram of coupler

把光纤放入耦合器中,将耦合器置于复眼透镜筒内,精细调节光纤端面与聚焦光斑的位置关系,使光纤传输的激光能量最强,此时为最佳耦

合状态。然后,拧紧耦合器螺帽,固定最佳耦合状态位置。实验测得耦合器和光纤的总损耗为 21%。

3 实验结果与分析

3.1 复眼回波信号实验

对复眼中的一个单元(4个)进行了远场信号(约 120 m)探测实验。图 3 为复眼接收系统实验装置图。

目标为如图 4 所示的建筑物侧面。将探测激光打到建筑物不同位置,使用复眼接收系统对回波信号进行探测,并比较不同复眼对应的示波器显示的波形。

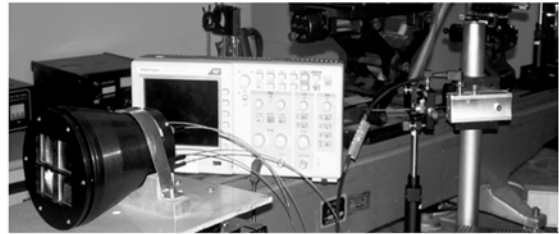


图 3 复眼接收系统实验装置图

Fig. 3 Overall construction of compound eye receiving system

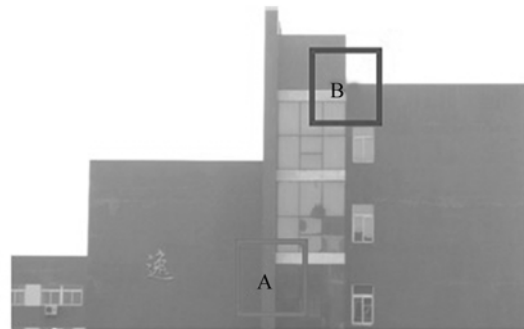
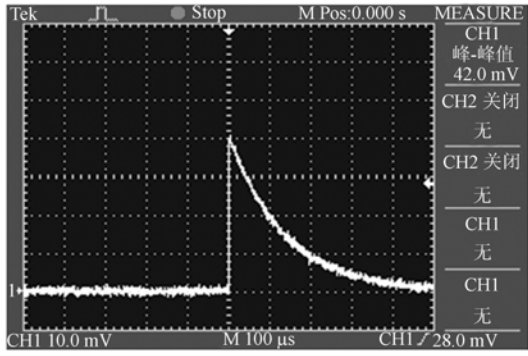


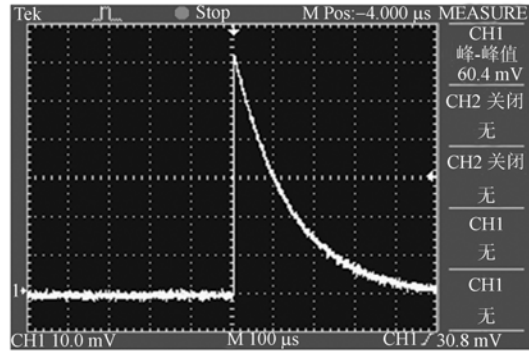
图 4 复眼系统探测区域

Fig. 4 Detection area of compound eye receiving system

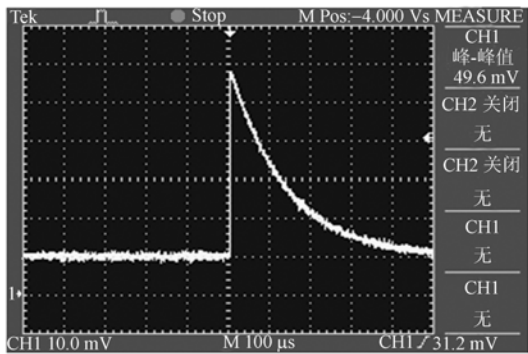
将发射激光对准建筑物目标 A,通过对光学复眼所构成的光学系统的调节,对激光回波进行接收,结果如图 5。由探测器得到回波波形可以看出,在每个接收器所对应视场中,都探测到了相应的信号,说明目标物体充满了整个探测视场,与实际目标相符。进一步对探测波形进行分析,可



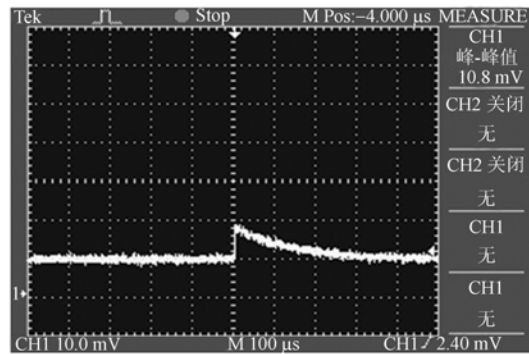
(a)Detector 1



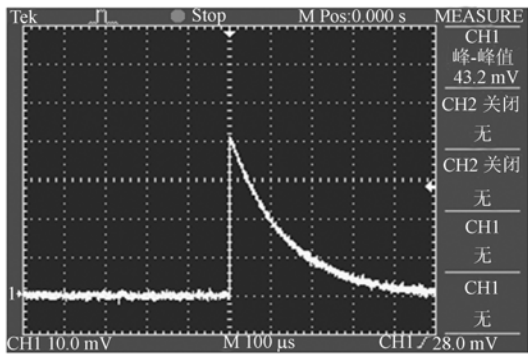
(a)Detector 1



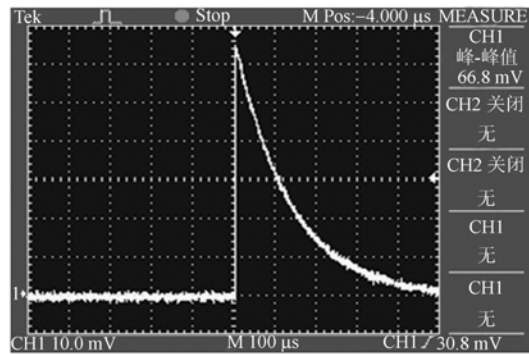
(b)Detector 2



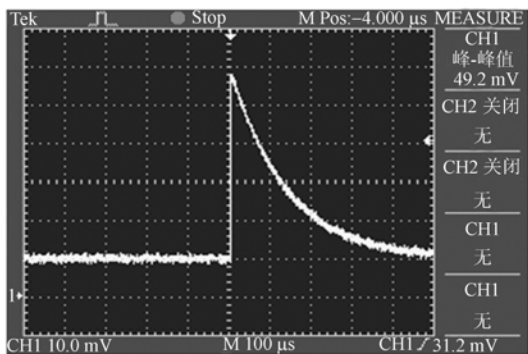
(b)Detector 2



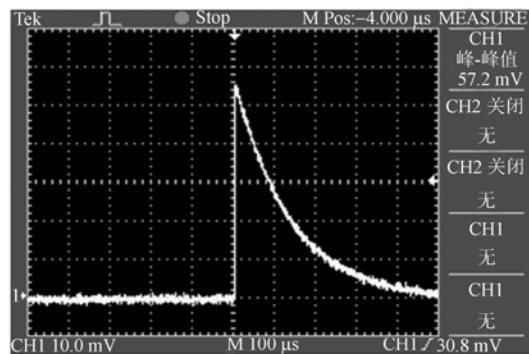
(c)Detector 3



(c)Detector 3



(d)Detector 4



(d)Detector 4

图 5 目标 A 的回波波形

Fig. 5 Echo waveforms of target A

图 6 目标 B 的回波波形

Fig. 6 Echo waveforms of target B

发现每个接收镜探测到的波形在幅值上还是有微小的差别。这主要是由于目标物体材质(墙面和玻璃)对于探测光的反射率不同,导致反射回来的光强度不同,造成探测结果出现差异。

当发射激光对准建筑物的目标 B 时,调节接收系统的接收视场,结果如图 6。可以看出:复眼探测器 1,3,4 探测到了较强的回波信号,复眼探测器 2 虽然也有较小幅值的回波信号,但与前 3 个探测结果相比可忽略。因此,只有复眼探测器 1,3,4 所对应的视场范围内有目标物体存在,复眼探测器 2 视场范围没有目标存在,与实际目标相符。对于探测器 2 探测到的波形,分析其原因除背景噪声的干扰外,还有接收镜筒 1,3,4 产生的干扰。

3.2 复眼距离成像实验

本文用 4 个复眼作为一个单元模拟替代整体接收系统进行了原理性验证,精确调整此单元的位置,使其探测区域为实验楼相邻的 4 部分目标。在调试基础上,将实验装置正对图 7 楼体拐角处(其中框内为探测区域),利用时刻鉴别技术,对测得数据处理后得出探测距离,并在计算机上距离成像,结果如图 8 所示。激光器发射频率为 20 Hz,每发射一次即可得到一帧距离图像。这里将空间坐标进行了一定的旋转,以获得更好的可视



图 7 实验楼照片

Fig. 7 View of laboratory building

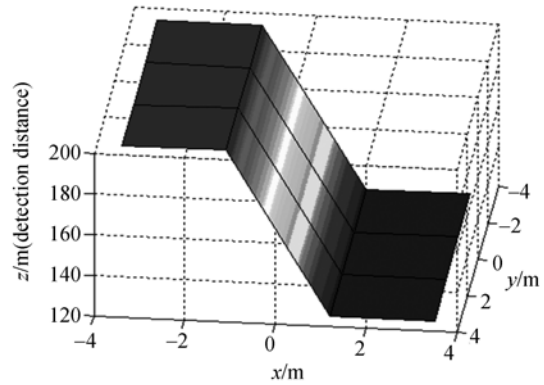


图 8 实验楼的轮廓图像

Fig. 8 Outline drawing of laboratory building

效果。从图 8 中可以看出楼体最远距离为 200 m,最近距离为 120 m。结果表明,光学复眼能够很好地反映探测目标的轮廓,其平面像点点阵间距为 $1.72 \text{ m} \times 1.72 \text{ m}$ 。

目前实验是将 4 次探测所得数据进行了理想的整体拼接,由于机械加工工艺和空间视场对准等问题,势必会影响到整个接收系统的有效填充因子,从而对系统探测能力有一定影响,这将是下一步工作中亟待解决的问题。

4 结 论

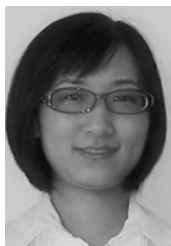
本文设计了一种新型光学接收探测系统,由实验结果可以看出,该复眼探测系统可以对探测目标进行距离成像,探测距离可达 200 m 以上,其平面像点点阵间距为 $1.72 \text{ m} \times 1.72 \text{ m}$,能够反映探测目标的轮廓特征。下一步将在之前工作的基础上,增加光学复眼的个数,使每个复眼对应的视场范围进一步缩小,从而大幅度提高探测精度,使成像结果能更加精确地反映探测目标的细节特征。该探测系统可适用于导弹末制导或低空飞行器下视地形匹配等,对凝视激光雷达的研制有重要指导意义。

参考文献:

- [1] HORRIDGE G A. The compound eye of insects [J]. *Scientific American*, 1977, 237:108-120.
- [2] HORRIDGE G A. The separation of visual axes in apposition compound eyes [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 1978, 285:1 - 59.
- [3] HORISAKI R, IRIE S, OGURA Y, *et al.*. Three-dimensional information acquisition using a compound imaging system [J]. *Optical Review*, 2007, 14(5):347-350.
- [4] DUPARRÉ J, DANNBERG P, SCHREIBER P, *et*

- al.. Thin compound-eye camera[J]. *Applied Optics*, 2005,44(15):2949-2956.
- [5] TANIDA J, SHOGENJI R, KITAMURA Y, et al.. Color imaging with an integrated compound imaging system [J]. *Optics Express*, 2003, 11(18):2109-2117.
- [6] DUPARR J, SCHREIBER P, MATTHES A, et al.. Microoptical telescope compound eye [J]. *Optics Express*, 2005,13(3):889-903.
- [7] DUPARR J, DANNBERG P, SCHREIBER P, et al.. Thin compound-eye camera[J]. *Applied Optics*,2005,44(15):2949-2956.
- [8] DUPARRE J. Microoptical telescope compound eye [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3):889-903.
- [9] 张红鑫,卢振武,王瑞庭,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, WANG R T, et al.. Study on curved compound eye imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 346-350. (in Chinese)
- [10] LI L, ALLEN Y Y. Development of a 3D artificial compound eye[J]. *Optics Express*, 2010,18(17): 18125-18137.
- [11] RADTKEA D, DUPARRE B J, UWE D, et al.. Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye[J]. *Optics Express*, 2007,15(6):3067-3077.

作者简介:



谭雪春(1978—),女,吉林长春人,讲师,博士研究生。2006年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事激光技术及光信息传播的研究。E-mail: tanxc21@126.com



武志超(1979—),男,黑龙江宾县人,2010年于长春理工大学获得博士学位,主要从事激光技术和应用的研究。E-mail:wuzhichao06@163.com



梁柱(1938—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1962年于吉林大学获得学士学位,主要从事于激光理论和技术的研究。E-mail: liangzhuciom@163.com