

doi: 10.3788/gzxb20144306.0612001

仿生眼的动目标位置快速估计算法

邢强^{1,2}, 戴振东¹, 王浩¹

(1 南京航空航天大学 仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016)

(2 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘要:昆虫复眼由成百上千个小眼组成, 具有大视范围内的快速识别能力. 本文仿昆虫复眼的快速定位特性, 提出一种基于小眼视场交汇空间分区的动目标位置快速估计算法. 根据探测器阵列组合与空间视野范围的对应关系建立参量方程, 参量为检测到动目标时探测器阵列的组合方式; 模拟探测器阵列与运动目标, 验证定位算法的快速估计能力; 最后通过阈值比较获得检测到目标的探测器组合方式, 求解参量方程实现目标定位. 对定位计算结果与实际模拟距离进行比较, 结果表明该算法能够实现不同大小目标在不同运动轨迹下的位置估计.

关键词:仿生学; 位置测量; 运动估计; 空间划分; 实时系统; 复眼; 多通道系统

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0612001-5

A Rapid Position Estimation Algorithm Inspired of Compound Eyes

XING Qiang^{1,2}, DAI Zhen-dong¹, WANG Hao¹

(1 Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2 College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Compound eye consists of thousands of ommatidia, which insures the ability of fast detection and location on obstacles and predators. Inspired of compound eye, a method of fast location estimation was proposed. Firstly, a parametric equation between space and detectors field of view was established including unknown parameters, which can be gotten from the array of detectors detected moving targets; secondly, detectors in line array were used to get moving objects signals by simulation; finally, analyse the signal data with threshold to form the array of detectors', which was used to solve parametric equation and achieve positioning. Compared with the result between actual distance and the calculated, the results show the method can achieve the target location estimation of different sizes in different trajectories in time.

Key words: Bionics; Position measurement; Motion estimation; Spatial distribution; Real-time systems; Compound eyes; Multi-channel systems

OCIS Codes: 120.0120; 330.4150; 150.5670; 150.1135; 200.4960; 040.0040; 040.1240

0 引言

获取周边物体的位置是机器人视觉导航和避障的核心内容, 随着机器人性能的提高、应用领域的扩大,

对机器人的快速视觉定位提出了更高的要求. 目前, 机器人视觉导航常采用激光、雷达以及双目视觉系统结合三角定位法实现^[1-3]. 但激光、雷达价格昂贵、体积大、能耗高, 不适用于具有动目标的快速定位、避障功

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61233014)、中国博士后科学基金(Nos. 2012M521071, 20123218110031)和国家自然科学基金重大国际合作项目(No. 61161120323)资助

第一作者:邢强(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向仿生物机器视觉. Email: xingqiang85@nuaa.edu.cn

导师:戴振东(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为仿生学、摩擦学. Email: zddai@nuaa.edu.cn

通讯作者:王浩(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为仿生传感器、生肌接口. Email: haowang@nuaa.edu.cn

收稿日期:2013-09-26; **录用日期:**2013-12-29

<http://www.photon.ac.cn>

能的微型机器人视觉系统,与激光、雷达设备相比较,采用图像传感器实现目标定位较为直观,普遍,且易于实现,诸如通过视差原理实现的双目视觉定位以及仿生物的碰撞时间策略(Time To Collision, TTC)的快速定位、避障法。

视差测距法采用的面阵传感器可获取环境的大量信息,但是采用的遍历图像、特征点匹配等像素级别的计算方式降低了定位实时性^[4],而作为典型表征法^[5-9]的TTC算法能够实现对已知相对运动速度的着落面进行距离的快速判断,实现平稳着落^[10];但是对于未知速度的目标,却无法实现目标在视轴方向的位置确定以及在目标面的着落功能,一种具有高实时性、低数据处理量、并行处理的视觉系统定位系统在视觉导航中显得尤为重要。

在生物界,复眼的视觉神经系统相对简单^[11-12],但具有独特的视场大、体积小、灵敏度高、耗能低等特点,能够实现对动目标的快速定位^[13-14]。

根据复眼视觉特性,人们提出适用于微型机器人视觉导航的低数据处理量、并行处理的视觉快速测速、定位导航算法、梯度法^[15-16],延迟相关法^[17-20]等视觉算法,以简化或并行的方式实现传感器对信号的采集、分析,完成对动目标空间位置的快速估计。梯度算法^[16]和 Reichardt 运动检测模型(Element Movement Detector, EMD)^[21-23],主要解决了在传感器视轴垂直面内的动目标速度检测,但不能实现目标在传感器视轴方向的位置估计。

根据动物复眼神经系统结构简单、定位时间快的特点,假设复眼动目标定位过程为:当复眼观察到动目标时,检测到目标的小眼产生神经兴奋,未检测到目标的小眼则处于抑制状态;由于复眼的小眼间的夹角与小眼的视角是固定,昆虫可通过“学习”获得与小眼排列组合方式相关的目标位置“数据库”——即小眼排列组合决定唯一的空间位置;最后通过表示兴奋小眼的排列组合的“数据库”查询,实现目标快速定位。

本文根据以上假设,建立仿复眼的位置快速估计算法与探测器阵列结构,实现某时刻对空间目标位置的快速估计。该仿复眼机制的位置估计算法,不仅能够实现小体积、低能耗的光电二极管检测器的硬件设计,同时能够实现对未知目标空间位置(传感器视轴方向以及视轴垂直面内)的高实时性快速估计。

1 仿复眼的快速定位算法

1.1 定位算法原理

采用线阵探测器阵列模拟昆虫并列型复眼结构,建立如图1所示坐标系,其中 z 轴方向与探测器视轴中心线方向平行;视角为 2β 的探测器以间距 L 进行线阵排列,相邻探测器具有重叠视野区域与视轴方向;

A 、 B 、 C 、 D 、 E 区域分别在探测器视野范围划分的网格区间内。

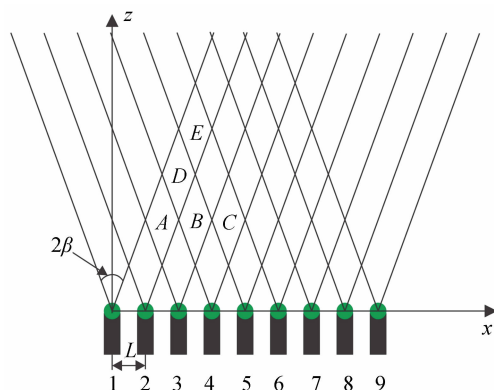


图1 探测器视野的空间区域划分

Fig.1 Spatial distribution between view angle of detectors

探测器视野范围将平面区域几何网格划分,区域与检测到目标的探测器的关系如表1。在9探测器系统中,可采用“011000000”来代表区域A,“000110000”代表B区域,建立区域与探测器“0、1”代码间的一一对应关系。根据图1中的区域划分: A 、 B 、 C 区域存在 x 方向上的位置变化表现在能够观察到该区域的探测器数量不变,位置改变; A 、 D 、 E 区域在 z 轴和 x 轴方向的变化表现在能够观察到该区域的探测器数量和位置均在变化,那么不同的探测器数量与位置的组合方式可以唯一地表示探测器阵列视角范围内的某一空间区域,即可通过参量化方程实现空间区域划分;其次通过探测器的数量、位置组合实现对目标的快速定位。

表1 区域分割与探测器的组合关系

Table 1 Relationship between distribution spatial and detector arrays

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0	1	1	0	0	0	0	0	0
B	0	0	1	1	0	0	0	0	0
C	0	0	0	1	1	0	0	0	0
D	0	1	1	1	0	0	0	0	0
E	0	1	1	1	1	0	0	0	0

注:表中的1表示探测器检测到运动目标;0表示未检测到运动目标

1.2 参量方程

在探测器数量、视角以及位置关系确定后,可实现探测器排列对空间区域的几何划分。如图1所示,建立图示 x - z 坐标系,并从左到右依次标定探测器阵列的位置编码。采用图中菱形区域的中心点 (x^n, z^n) 来表示 n^{all} 个探测器同时检测到动目标所在的空间位置,其中 $n=1, 2, 3 \dots 9$ 。根据几何空间规划,可得含有探测器阵列组合的参量方程为

$$(x^n, z^n) = \left[\frac{n^{\text{max}} + n^{\text{min}} - 2}{2} L, \frac{n^{\text{all}}}{2 \cdot \tan \beta} \cdot L \right] \quad (1)$$

式中 L 表示相邻探测器的间距,探测器的水平视角为

$2\beta; n^{\max}, n^{\min}$ 为探测器中连续检测到动目标的探测器的最大与最小编号, n^{all} 表示检测到目标的探测器总数(其中 $0 \leq n^{\text{all}} \leq 9$).

在参量方程确立以后,当目标运动到某个空间区域时,探测器的检测信号会发生变化;通过记录发生变化的传感器的排列组合,解析排列组合带入参量方程即可实现位置快速估计.

2 定位测速过程

如图 2 所示,标号 1, 2, 3, \dots i 分别表示模拟复眼结构的光电探测器;LP 为信号低通滤波器;T 表示比较器阵列. 如果信号大于阈值时, T_i 输出信号 1, 否则输出 0; 0/1 为位置触发器, 当 T_i 信号为 1 时, T_{i1} 输出传感器对应序号 i , 否则输出 0; K 运算器的公式为 $[n^{\text{all}} / (2 \cdot \tan \beta)] \cdot L$; V 运算器的计算公式为 $(n^{\max} + n^{\min} - 2)L/2$.

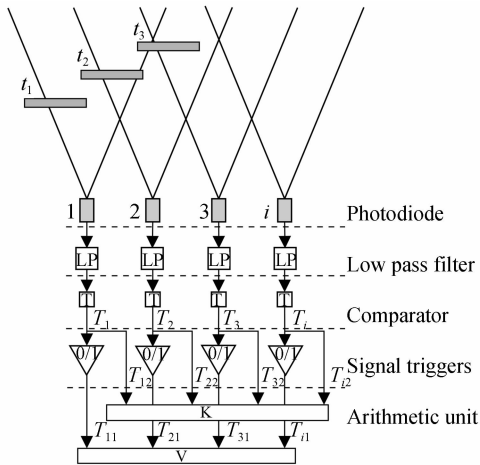


图 2 系统定位示意图

Fig. 2 Schematic of positioning system

在系统工作时,初始化背景信息;假定物体在 t_1 时刻进入系统,对应 1 号探测器的三个光电二极管检测到目标信号,通过低通滤波与二值化后, $T_1 = 1, T_{11} = 1, T_{12} = 1$, 其中 $n^{\text{all}} = 1, n^{\max} = 1, n^{\min} = 1$, 代入公式 K、V, 计算目标位置 p_1 为 $(0, L/(2 \cdot \tan \beta))$; 当目标运动到 t_2 时刻, $T_1 = 1, T_{11} = 1, T_{12} = 1, T_2 = 1, T_{21} = 1, T_{22} = 1, n^{\text{all}} = 2, n^{\max} = 2, n^{\min} = 1$, 代入 K、V 计算的空间位置 p_2 为 $(L/2, L/\tan \beta)$; 目标在 Δt 时间内目标的运动速度可表示为 $v = (x, z)$, 若 x 为正则表示目标运动方向与探测器序号排列方向一致, 否则相反, 若 z 为正则表示目标由远运动. 通过 t_1, t_2 时刻检测到的空间位置, 可以获得目标运动速度

$$v = (p_2 - p_1) / \Delta t = \left(\frac{L}{2\Delta t}, \frac{L}{2\tan \beta \cdot \Delta t} \right) \quad (2)$$

根据判断可知目标从左到右, 由近到远运动.

该算法中忽略了目标大小及空间划分中间区域与边界的不均匀, 可能存在对目标大小以及边界定位引

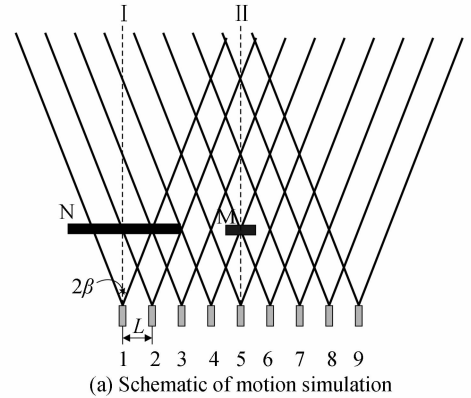
入的定位不准确. 主要是由于对检测到目标的探测器阵列的数量统计不准确导致, 可根据目标大小以及边界出现的情况给出检测到目标探测器数量的标准, 解决存在问题.

3 算法验证

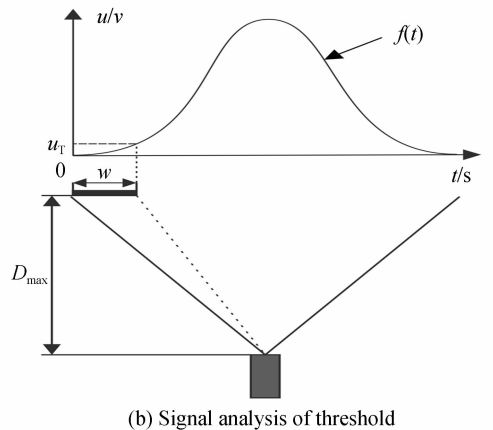
3.1 实验设计

采用 TSL250R 光电二极管阵列作为基本探测器单元, 设定探测器水平视角大小 $2\beta = 45^\circ$, 两探测器之间的间距 $L = 10 \text{ mm}$; 设定运动目标 M (或者 N) 的长度为 L (或者 $4L$), 目标沿着轨迹 I (或者 II) 由近而远匀速运动.

如图 3(b) 所示, 当目标 w 运动通过探测器视野时获得呈高斯函数分布的信号函数 $u(t)$ ^[24]. 在实验中, 采用目标 w 在最远距离 D_{\max} 全部进入探测器视野时探测器获得的信号 u_T 为阈值. 根据上述设定, 将采集的信号维纳低通滤波以及阈值 (u_T) 比较器等信号处理过程, 得到相应结果. 目标 M 所在的空间位置 (见图 3(a)), 探测器阵列的检测结果见表 2.



(a) Schematic of motion simulation



(b) Signal analysis of threshold

图 3 运动模拟与信号分析示意图

Fig. 3 Schematic of motion simulation and signal analysis

根据表 2, 可得

$$n^{\text{all}} = \sum_{i=1}^9 T_{i1} = 3 \quad (3)$$

$$n^{\max} = \max(T_{i2}) = 6 \quad (4)$$

$$n^{\min} = \min(T_{i2}) = 4 \quad (5)$$

得到目标所在位置为

$$(x^3, z^3) = \left[\frac{n^{\max} + n^{\min} - 2}{2} L, \frac{n^{\text{all}}}{2 \cdot \tan \beta} \cdot L \right] = \left[4L, \frac{3L}{z \cdot \tan \beta} \right] \quad (6)$$

表 2 目标 M 在探测器阵列中的检测结果

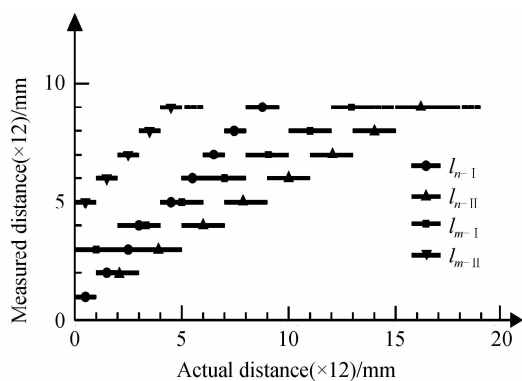
Table 2 Test results of object M in camera array

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_i	0	0	0	1	1	1	0	0	0
T_{i1}	0	0	0	1	1	1	0	0	0
T_{i2}	0	0	0	4	5	6	0	0	0

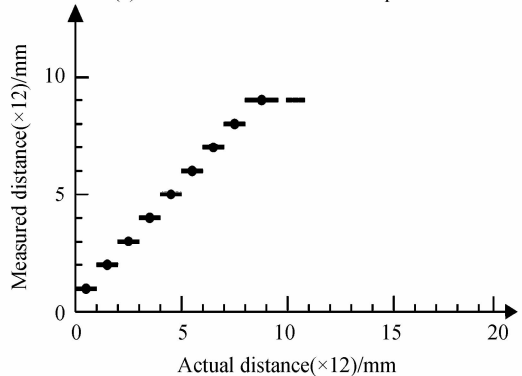
注:表中的 1 表示探测器检测到运动目标;0 表示未检测到运动目标

3.2 实验结果与分析

模拟目标 M、N 分别沿运动轨迹 I、II 匀速运动,测得在 z 轴方向的目标距离 l 如图 4. 其中 l_{n-1} 表示 N 目标沿着 I 运动轨迹运动,通过探测器阵列的阈值比较及定位算法获得的定位结果,如图 4(a).



(a) Simulation results before improvement



(b) Simulation results after improvement

图 4 定位算法仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the location algorithm

探测器阵列在目标运动时采集相应的电压信号,通过信号与阈值 u_T 的比较判断含有目标位置信息的“0\1”矩阵,获得 T_{i1} 、 T_{i2} ,将结果代入式(1),获得定位距离 p_1 、 p_2 ;通过 $v = (p_2 - p_1) / \Delta t$ 实现运动运动方向判断.

从图 4(a)中不难发现:1)对于相同的目标 M(或 N)在视轴中心线 I、II 中的运动,通过计算获得的定

位结果却存在明显误差,这主要是由于在 I 方向运动时处于系统的边界,从而产生的探测器数量判断误差;2)对于相同轨迹 I(或 II),不同大小的目标 M、N 同样存在定位的误差,这主要是由于物体较大时且距离较近时产生探测器视野全部遮蔽而导致探测器数量的误判.

3.3 定位算法的改进与结果

边界和目标的大小影响到传感器的数量从而影响定位的准确性;要通过对探测器中信号与所在位置结合分析来解决.探测器获得目标信号后,首先通过阈值实现目标检测;然后统计信号相同探测器的序号总数 N_s ;其次比较探测器阵列中检测到目标的两端信号最左端探测器信号 u_L 与最右端探测器信号 u_R 之间的关系,如果 $|u_L - u_R| > u_T$,那么检测到目标探测器的数量为 $\{ |n_L - n_R| / 2 + 1 \} \times 2 - N_s$,其中 $\{ \}$ 表示进一法; n_L 、 n_R 表示检测到动目标的探测器最左端、最右端探测器的序号;最后通过边界界定与算法对目标大小适应性的改进.重复实验,可获得如图 4(b)的定位结果.

4 结论

通过模拟探测器阵列视野内的目标运动,验证了该算法对目标在不同轨迹下运动的快速估计的可行性.在实际应用中,可通过硬件电路的设计实现光电二极管的并行采集信号处理,提高了系统定位的实时性.

该算法通过判断传感器在某一时刻目标信号的有无,实现目标定位.与双目视差原理相比较,硬件上更为简单,可采用硬件设计实现并行,具有更好的实时性;相对于其他的仿复眼目标定位系统,能够实现目标在传感器视轴方向上的目标定位.但是该算法实现的目标定位属于对目标空间位置的大致范围的快速估计,较适用于大视场下对动目标空间定位的初步快速估计领域,为系统实现快速避障导航等响应赢得更多时间.

参考文献

- [1] DI Hui-ge, HUANG Geng-hua, SHU Rong, *et al.* Detecting equation of spaceborne laser rangefinder to particale-target[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 526-528.
狄慧鸽, 黄庚华, 舒嵘, 等. 星载激光测距系统点目标探测方程研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 526-528.
- [2] MOURIKIS A I, TRAWNY N, ROUMELIOTIS S I, *et al.* Vision-aided inertial navigation for spacecraft entry, descent, and landing[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, **25**(2): 264-280.
- [3] SIBLEY G, MATTHIES L, SUKATHME G. Sliding window filter with application to planetary landing[J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, **27**(5): 587-608.
- [4] WANG Di, WANG Jie, FU Xiao-ning. A passive ranging system based on image sequence from signal lens and the respective imaging direction along with its performance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1112-1116.
王荻, 王洁, 付小宁. 基于单目图像和方向的测距系统及性能

- 分析[J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 1112-1116.
- [5] BAIRD E, BOEDDEKER N, IBBOTSON M R, *et al.* A universal strategy for visually guided landing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, **110**(46): 18686-18691.
- [6] NISHIO K, YONEZU H, OHTANI M, *et al.* Analog integrated circuit for motion detection of approaching object based on the insect visual system[J]. *Optical Review*, 2004, **11**(1): 38-47.
- [7] TAO Sheng, ZENG Li-jiang. Angular velocity measurement system based on insect vision [J]. *Journal-Tsinghua University*, 2007, **47**(8): 1308-1311.
陶圣, 曾理江. 基于昆虫视觉原理的角速度测量系统[J]. 清华大学学报, 2007, **47**(8): 1308-1311.
- [8] BORST A. Correlation versus gradient type motion detectors: the pros and cons [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, **362**(1479): 369-374.
- [9] NISHIO K, YONEZU H, FURUKAWA Y. Analog vision chip for motion detection of an approaching object against a moving background based on the insect visual system [J]. *Optical Review*, 2007, **14**(3): 111-119.
- [10] IZZO D, CROON G D. Landing with time-to-contact and ventral optic flow estimates [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, **35**(4): 1362-1367.
- [11] BENSON J B, WRIGHT C H, BARRET S F. Redesign and construction of an artificial compound eye visual sensor[J]. *Biomedical Sciences Instrumentation*, 2008, **44**: 367-372.
- [12] RILEY D T, BARRENT S F, WILCOX M J, *et al.* Musca domestica inspired machine vision system with hyperacuity [C]. *Smart Structures and Materials*. International Society for Optics and Photonics, 2005: 304-320.
- [13] BITSAKOS K, FERMULLER C. Depth estimation using the compound eye of dipteran flies[J]. *Biological Cybernetics*, 2006, **95**(5): 487-501.
- [14] JARVIS R A. A perspective on range finding techniques for computer vision[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1983, **5**(2): 122-139.
- [15] SARKAR M, THEUWISSEN A. Motion Detection and Digital Polarization[M]. *A Biologically Inspired CMOS Image Sensor*. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 215-245.
- [16] STOCKER A. Analog integrated 2-D optical flow sensor[J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2006, **46**(2): 121-138.
- [17] HARRISON R. A biologically inspired analog IC for visual collision detection[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2005, **52**(11): 2308-2318.
- [18] IZZO D, WEISS N, SEIDL T. Constant-optic-flow lunar landing optimality and guidance[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, **34**(5): 1383-1395.
- [19] KERHUEL L, VIOLLET S, FRANCESCHINI N. The vodka sensor: A bio-inspired hyperacute optical position sensing device[J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2012, **12**(2): 315-324.
- [20] HERISSE B, HAMEL T, MAHONY R, *et al.* Landing a vtol unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow [J]. *IEEE Transaction on Robotics*, 2012, **28**(1): 77-89.
- [21] ZHANG Tian-guang, WU Hai-yan, BROAST A, *et al.* An FPGA implementation of insect-inspired motion detector for high-speed vision systems[C]. *Robotics and Automation*, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on. IEEE, 2008: 335-340.
- [22] YIN Jun, LI Dong-Guang, FANG Hui-Min, *et al.* Moving objects detection by imitating biologic vision based on fly's eyes[C]. 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2004: 763-766.
- [23] QUELIN M, BOUZERDOUM A, SON L P. Fast digital optical flow estimation based on EMD [C]. *Visual Information Processing (EUVIP)*, 2010 2nd European Workshop on IEEE, 2010: 155-158.
- [24] BORST A, HAAG J, REIFF D F. Fly motion vision[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 2010, **33**: 49-70.