

引文格式:

徐韵哲, 陈建. 基于仿斑马鱼和仿鹰眼视觉的复杂背景下目标识别 [J]. 集成技术, 2024, 13(2): 39-51.

Xu YZ, Chen J. Target recognition in complex background inspired by zebrafish and eagle eye vision [J]. Journal of Integration Technology, 2024, 13(2): 39-51.

基于仿斑马鱼和仿鹰眼视觉的复杂背景下目标识别

徐韵哲^{1,2} 陈建^{1*}

¹(中国农业大学工学院 北京 100083)

²(农业农村部华南热带智慧农业技术重点实验室 广州 510642)

摘要 针对反制无人机识别系统在公共场所内部复杂背景下的无人机识别问题, 该文研究了一种基于仿斑马鱼模板匹配视觉识别和仿鹰眼视觉注意的目标识别方法, 通过建立不同姿态的无人机模板数据库, 采用仿鹰眼视觉搜索机制, 结合尺度不变特征变换, 将姿态模板图像与目标进行匹配, 获得粗略的目标区域。然后计算模板姿态与目标姿态的 Hausdorff 距离, 比较目标姿态相似性, 获得最相似姿态。采用仿鹰眼视觉注意机制对遮挡图像进行处理, 提高目标识别的显著性。实验结果表明, 该方法能够在不同复杂背景下实现无人机的准确识别, 与光谱残差的显著性目标识别方法相比, 平均运行时间提高 23.5%, 与差异哈希算法相比, 具有更高的结构相似性指数。

关键词 无人机识别; 斑马鱼视觉; 鹰眼视觉; 模板匹配; 视觉注意机制

中图分类号 TP 391.4 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20230724002

Target Recognition in Complex Background Inspired by Zebrafish and Eagle Eye Vision

XU Yunzhe^{1,2} CHEN Jian^{1*}

¹(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

²(Key Laboratory of Smart Agricultural Technology in Tropical South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510642, China)

*Corresponding Author: jchen@cau.edu.cn

Abstract To meet the requirements of anti-drone recognition system for drone recognition in the complex

收稿日期: 2023-07-24 修回日期: 2023-12-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001405); 国家自然科学基金项目(51979275); 浙江省农业智能装备与机器人重点实验室开放课题项目(2023ZJZD2306); 自然资源部超大城市自然资源时空大数据分析应用重点实验室开放基金项目(KFKT-2022-05); 深圳市科技计划资助项目(ZDSYS20210623091808026); 虚拟现实技术与系统全国重点实验室(北京航空航天大学)开放课题基金项目(VRLAB2022C10); 能源清洁利用国家重点实验室开放基金课题项目(ZJUCEU2022002); 农业农村部长三角智慧农业技术重点实验室开放基金项目(KSAT-YRD2023005); 农业农村部华南热带智慧农业技术重点实验室开放课题(HNZHNY-KFKT-202202); 高等教育科学研究规划课题重点课题(23XXK0304); 中国农业大学2115人才工程项目

作者简介: 徐韵哲, 硕士研究生, 研究方向为仿生视觉感知技术; 陈建(通讯作者), 研究员, 博士生导师, 研究方向为无人系统导航、制导与控制, E-mail: jchen@cau.edu.cn.

background within public places, a target recognition method based on zebrafish template matching vision recognition and eagle eye visual attention was studied in this paper. By establishing a dataset of drone templates with different postures, combining the eagle eye visual search mechanism with scale invariant feature transformation, the attitude template image is matched with the target to obtain a rough target area. Then calculate the similarity of the Hausdorff distance between the template pose and the target pose to compare the similarity of the target pose and obtain the most similar pose. Using the eagle eye visual attention mechanism to process occluded images and improve the saliency of target recognition. Experimental results showed that, the anti UAV recognition system can realize the recognition of drones in different complex backgrounds. Compared with the significance target recognition method based on spectral residuals, the average running time is improved by 23.5%. The proposed algorithm has a higher structural similarity index than the differential hash algorithm for finding similar template poses.

Keywords drone recognition; zebrafish vision; eagle eye vision; template matching; visual attention mechanism

Funding This work is supported by National Key Research and Development Plan Project (2022YFD2001405), and National Natural Science Foundation of China (51979275), and Open Subject of Key Laboratory of Intelligent Equipment and Robotics for Agriculture of Zhejiang Province (2023ZJZD2306), and Open Fund of Key Laboratory of Spatial-temporal Big Data Analysis and Application of Natural Resources in Megacities, Ministry of Natural Resource (KFKT-2022-05), and Shenzhen Science and Technology Program (ZDSYS20210623091808026), Open Project Program of State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University (VRLAB2022C10), and Open Project of State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (ZJUCEU2022002), and Open Fund of Key Laboratory of Smart Agricultural Technology (Yangtze River Delta), Ministry of Agriculture and Rural Affairs (KSAT-YRD2023005), and Open Project Program of Key Laboratory of Smart Agricultural Technology in Tropical South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (HNZHNY-KFKT-202202), and Higher Education Scientific Research Planning Project (23XXK0304), and 2115 Talent Development Program of China Agricultural University

1 引 言

无人机在发展迅速的同时，也带来了安全隐患。“黑飞”无人机飞入居民楼窥探他人隐私，导致公众财产安全和隐私安全受到威胁。因此，对大型公共场所内部“黑飞”的无人机采取反制措施对保护公众隐私、维护公共秩序具有重要意义^[1]。

大型公共场所内部的反制无人机识别系统可以采用机器视觉的方法进行识别测量。图像的分析方法包括人工特征点法和深度学习方法。传统特征提取包括尺度不变特征变换 (scale invariant

feature transform, SIFT)^[2]、加速鲁棒特征^[3]和快速特征点提取和描述^[4]。人工特征点法广泛应用于目标的识别定位^[5]、即时定位与地图构建^[6]、图像拼接^[7]等。Gao 等^[8]提出改进的 SIFT 算法 (ASIFT)，将 SIFT 提取的特征点与二进制鲁棒不变可伸缩关键点描述子相结合，生成二进制特征描述子，利用汉明距离实现匹配。为提高识别精度，Zhang 等^[9]基于双边滤波、加速鲁棒特征提取和快速最近邻算法提高点特征提取结果的鲁棒性。卜庆志等^[10]提取图像梯度方向直方图特征，优化支持向量机分类器中的参数，实现驾驶

员注意力分散行为的检测。基于深度学习方法的神经网络存在模型不可解释的问题, 且训练需要大量图像数据, 训练过程复杂。

生物视觉给智慧视觉提供了新思路^[11]。5 天大的斑马鱼幼鱼具有发育良好、功能齐全的视觉系统^[12]。He 等^[13]发现斑马鱼的紫外视锥细胞支持高频信号的传输, 这表明该位置的视觉通道有助于斑马鱼编码快速变化的视觉特征。鹰眼视觉机制已经广泛应用于目标识别与检测领域和动态路径规划^[14]等。Duan 等^[15]采用鹰眼自适应机制实现眩光和昏暗的海面目标的识别。张自超等^[16]采用鹰眼视觉注意机制实现对果园的三维点云重建。在硬件和控制方面, Deng 等^[17]设计视觉平台, 模仿鹰眼的大视场和视觉变焦能力; 钟勇等^[18]提出一种新型欠驱动控制方法, 实现仿生机器鳗鱼控制。鹰在猎物被草丛、水面遮挡的情况下, 仍可快速识别猎物, 这给复杂背景下反制无人机识别系统的目标识别提供了思路。

基于仿生视觉的思路, 本文针对复杂背景下无人机的姿态识别, 提出基于仿斑马鱼视觉机制和仿鹰眼视觉机制的目标识别方法。在遮挡背景下, 该目标识别方法能够实现目标的识别和相似姿态的确定。本文的创新点总结如下。

(1) 基于仿斑马鱼亲属模板匹配机制, 对无人机姿态建立姿态数据集, 在提高模板匹配识别增强算法识别可靠性的同时, 提高目标在受遮挡情况下的鲁棒性。

(2) 基于仿鹰眼视觉注意机制, 在目标受遮挡时去除冗余信息, 提高目标识别的显著性, 增强目标无人机的识别精度。

2 仿斑马鱼和仿鹰眼视觉机制的原理

2.1 斑马鱼视觉模板匹配机制

研究发现, 在识别亲属和非亲属方面, 斑马鱼已经进化出一种非常有效的方法^[19]。斑马鱼处

于幼年时, 对亲属的气味和视觉特征进行编码记忆, 且嗅觉和视觉特征的印记不会出现在非亲属上, 从而保证它们能够准确地识别亲属^[20]。这相当于斑马鱼在幼年时依据气味和视觉信息建立了一个亲属信息的模板数据库, 并在成长的过程中不断更新亲属的颜色、形状等特征。当斑马鱼识别目标时, 斑马鱼的视觉系统的感光细胞接受外界信息刺激, 并对信息进行处理。感光细胞包括视锥细胞和杆状细胞。视锥细胞对彩色和强光敏感, 而杆状细胞对无色和弱光敏感。新的视觉信息特征编码传入神经系统, 与之前建立的亲属特征模板数据库匹配比较, 找出最匹配、最相似的一个, 从而完成亲属的识别判断。图 1 为斑马鱼目标识别过程。

2.2 鹰眼视觉注意机制

鹰享有“鸟中之王”的美誉, 这不仅是因为鹰具有锐利的钩曲嘴和锋利的爪子, 还因为其敏锐的视觉、超群的视力使它即使在几千米外的高空都能准确地识别猎物。鹰的视觉系统中有两个中央凹结构: 一个深凹和一个浅凹。双中央凹结构使鹰眼同时具有大视场和局部高分辨率^[21]。深凹主要识别视觉侧前方成像, 与浅凹识别的正前方成像组合构成鹰眼的大视场。浅凹中密布着视锥细胞, 使得正前方成像具有更高的分辨率。鹰在捕捉猎物时, 利用深凹获得大视野, 对复杂环境(如草地、丛林、水面等)进行全局搜索。当它们发现目标时, 会更加频繁地注视目标^[22]。此时, 在全景场景中, 鹰会忽略不感兴趣的区域, 自动使用浅凹对焦感兴趣的区域(显著区域), 获得高分辨率信息的目标猎物。鹰在视野中提取感兴趣区域, 过滤冗余信息, 将视觉注意力转移到视觉刺激中更加显著的部分, 这即为鹰眼的视觉注意机制。图 2 为鹰眼视觉注意机制的原理示意图。

2.3 基于仿斑马鱼模板匹配和仿鹰眼视觉注意机制的目标识别

本文基于仿斑马鱼亲属模板的视觉识别和

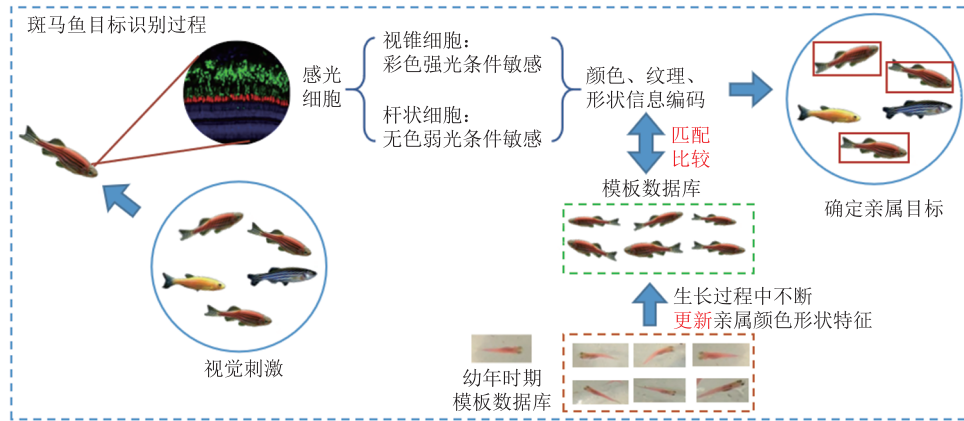


图1 斑马鱼目标识别过程

Fig. 1 Zebrafish target recognition process



图2 鹰眼视觉注意机制

Fig. 2 Eagle eye visual attention mechanism

仿鹰眼视觉注意机制的思想，提出复杂背景下的无人机姿态观测的匹配识别和遮挡环境下的无人机显著区域识别的研究算法，为抵制“黑飞”无人机提供基于视觉识别目标的反制识别系统。首先，输入复杂背景下的视频帧，采用 SIFT 算法将目标图像和模板图像 $template_0$ 进行匹配，实现复杂背景下的目标的大致区域获取，并裁剪获得只含有无人机目标的图像（简称“cut”）。然后基于仿斑马鱼亲属模板匹配的认识机制，提取无人机目标图像 cut 与无人机姿态模板数据集的特征点集，计算点集之间的 Hausdorff 距离（简称“HD”）。最小的 Hausdorff 距离对应的模板图像即为最相似的无人机姿态。若该姿态计算的 Hausdorff 距离偏大，则说明目标图像与模板图像虽然相似，但是仍不够精确。将此无人机目标图像 cut 更新至模板数据集中，以保证后续姿态匹配的精确。同时，若无无人机的姿态存在遮挡，则基

于鹰眼视觉注意机制将遮挡区域去除，获得无人机目标的显著区域，以实现更加精确的识别。本文提出的仿生视觉识别的技术路线图如图 3 所示。

3 复杂背景下的目标匹配识别

3.1 尺度不变特征变换提取特征

SIFT 由加拿大教授 Lowe^[2]提出。该算法是一种基于点特征的匹配算法，采用尺度不变特征变换从复杂背景中识别出目标，将图像数据转换为相对于局部特征的尺度不变坐标，提取的局部图像特征在原图像经旋转、平移、仿射变换、局部遮挡及亮度变化等情况下，仍具有良好的稳定性。SIFT 算法的特征提取步骤如下。

(1) 尺度空间极值检测

文献[23]指出：高斯核是实现尺度变换的唯一线性核，将输入的图像进行高斯滤波下采样，

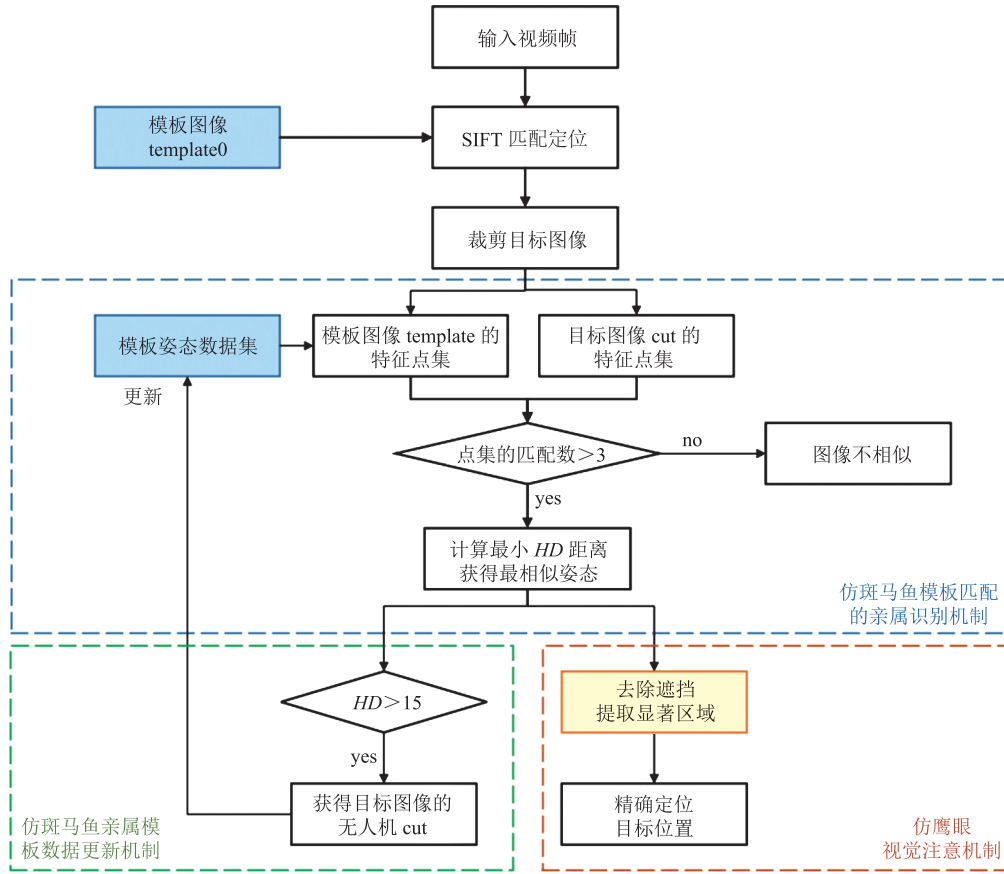


图3 仿生视觉识别的技术路线图

Fig. 3 Technology roadmap of bionic visual recognition

以构建不同尺度空间高斯金字塔。可变尺度的二维高斯核 $G(x, y, \lambda)$ 的表达式为:

$$G(x_i, y_i, \lambda) = \frac{1}{2\pi\lambda^2} \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 - (y-y_i)^2}{2\lambda^2}\right) \quad (1)$$

其中, λ 为尺度因子; (x, y) 为图像的像素坐标。

将原始图像 $I(x, y)$ 与高斯核 $G(x, y, \lambda)$ 卷积, 可得出该图像的尺度空间。

$$L(x, y, \lambda) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2)$$

其中, $I(x, y)$ 为原始图像; $*$ 为卷积运算。

(2) DOG 空间极值检测

为了降低算法的复杂度, 采用 DOG (高斯微分) 函数, 构建高斯差分金字塔 $D(x, y)$, 寻找极大值^[2], 通过高斯差分图像, 得出图像上的像素值变化, 快速有效地检测出稳定的关键点。高斯

差分尺度空间 DOG 函数的公式表示为:

$$D(x, y, \lambda) = [G(x, y, k\lambda) - G(x, y, \lambda)] * I(x, y) \quad (3)$$

其中, k 为阈值, 一般取 $\sqrt{2}$ 。

如图 4 所示, 将高斯金字塔的相邻两层图像相减, 得到高斯差分金字塔。然后剔除最顶层和最底层, 保留中间层。每个点与相邻像素点比较, 若为最大值或者最小值, 则作为候选点。

(3) 去除边缘不稳定特征点

为了增强匹配的稳定性, 利用边缘不稳定点在垂直方向上主曲率很小的特性, 消除不稳定点。主曲率采用 Hessian 矩阵计算, 该矩阵定义为:

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} , D_{yy} 由候选点邻域对应位置

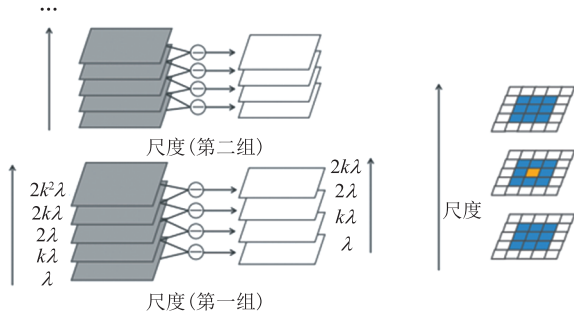


图4 高斯差分金字塔极值点检测过程

Fig. 4 Detection process of extreme points of difference of Gaussian pyramid

的差分计算得出。

Hessian 矩阵的迹和行列式表示为:

$$\text{Tr}(\mathbf{H}) = D_{xx} + D_{yy} = p + q \quad (5)$$

$$\text{Det}(\mathbf{H}) = D_{xx} + D_{yy} - D_{xy}^2 = pq \quad (6)$$

其中, p 为 Hessian 矩阵的最大特征值; q 为 Hessian 矩阵的最小特征值。

若 $\text{Det}(\mathbf{H}) < 0$, 则舍去该关键点; 若 $\frac{\text{Tr}(\mathbf{H})^2}{\text{Det}(\mathbf{H})} = \frac{(p+q)^2}{pq} = \frac{(rq+q)^2}{rq^2} = \frac{(r+1)^2}{r} < T$ (设 $r = \frac{p}{q}$), 则保留关键点, 反之剔除。阈值 T 越大, 获得的特征点越多; 阈值 T 越小, 获得的特征点越少。阈值 T 一般取 1.2。

(4) 确定关键点方向

为使特征点不受图像旋转的干扰, 在获得候选点后需为每个特征点分配一个不变的方向。关键点方向梯度的模值和方向计算公式为:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (7)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right) \quad (8)$$

其中, $m(x, y)$ 为像素 (x, y) 处的梯度模值; $\theta(x, y)$ 为像素 (x, y) 处的方向; L 为特征点所在尺度空间值。

(5) 生成描述子

当关键点具有梯度、方向、尺度 3 个信息后, 生成特征点唯一描述子。以特征点为中心, 选取 4×4 的邻域窗口, 再细分 4×4 , 共 16 个小格, 每小格 8 个方向精度, 统计每小格梯度幅值和方向, 并通过拟合或差值的方法获得更精确的方向。特征点梯度方向直方图以 $3 \times 1.5\lambda$ 为半径的圆作为统计窗口, 统计窗口内方向的累计, 方向累计最高的为该特征点的主方向。图 5 为特征向量图。

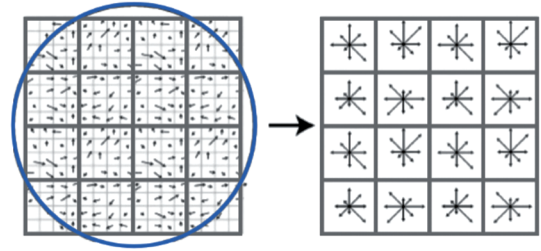


图5 特征向量图

Fig. 5 Eigenvector map

3.2 特征点集间的暴力匹配

一一比较两张图片特征点之间的度量距离, 选择度量距离最小的点作为特征点的匹配点, 该过程被称为暴力匹配。当图片特征点集的规模较大时, 暴力匹配搜索方法是不高效的, 但是精度较高。暴力匹配总是尝试所有可能的匹配。因无人机特征点占总体复杂背景的比例极少, 所以采用更精确的暴力匹配方法对无人机的特征点集进行匹配。

直接根据两张图像的描述子进行暴力匹配, 会出现较多的误匹配, 两张图像特征点的匹配结果需进一步筛选, 以获得优秀的匹配点。为了排除因图像遮挡和背景混乱而产生的无匹配关系的关键点, Lowe^[2]提出了比较最近邻距离与次近邻距离的 SIFT 匹配方式: 取一幅图像中的一个 SIFT 关键点, 并找出其与另一幅图像中欧式距离最近的前两个关键点, 在这两个关键点中, 如果最近的距离除以次近的距离得到的比率 ratio

小于某个阈值 (Lowe 推荐 ratio 的取值为 0.8^[2]), 则接受这一对匹配点。未筛选的匹配效果和经过 ratio 阈值筛选后的匹配效果的比较如图 6 所示。

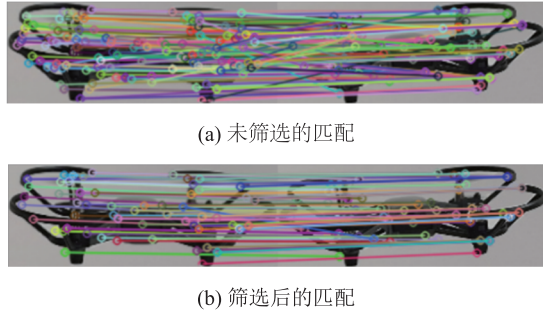


图 6 未筛选的匹配和经过阈值筛选后的匹配

Fig. 6 Unfiltered matches and matches after threshold filtering

筛选后的匹配点增加了两张图像目标匹配识别准确度, 以实现复杂背景下无人机目标区域轮廓的精确识别, 同时为无人机姿态相似性的判断做准备。

3.3 Hausdorff 距离判断相似姿态

Huttenlocher 等^[24]于 1993 年提出 Hausdorff 距离。Hausdorff 距离用来计算两个点集之间的最大、最小距离, 且不需要建立两个图像特征点之间的对应关系, 直接通过计算两个图像之间特征点集的最大距离, 实现两张图片的匹配度计算。因此, Hausdorff 距离算法对图像噪声和晃动有较好的鲁棒性。

假设模板图像为 A , 待匹配图像为 B , 特征提取后生成两个有限特征点集, 分别为 $A = (a_1, a_2, \dots, a_p)$ 和 $B = (b_1, b_2, \dots, b_q)$, 则 A 与 B 的 Hausdorff 距离定义如式 (9):

$$\begin{cases} H(A, B) = \max[h(A, B), h(B, A)] \\ h(A, B) = \max_{a \in A} \left[\min_{b \in B} (\|a - b\|) \right] \\ h(B, A) = \max_{b \in B} \left[\min_{a \in A} (\|b - a\|) \right] \end{cases} \quad (9)$$

其中, $h(A, B)$ 为前项 Hausdorff 距离; $h(B, A)$ 为后向 Hausdorff 距离; $\|a - b\|$ 为点集 A 到点集 B 的

欧式距离; $\|b - a\|$ 为点集 B 到点集 A 的欧式距离。

分析公式 (9) 可知, 特征点集之间距离越小, 两个图像的匹配程度越高。从图 7(a)~(d) 可以看出, 无人机向左倾斜的程度不断增加, 对应计算的 Hausdorff 距离也不断增加。由此可以判断, 使用 Hausdorff 距离可以对无人机的相似性进行判断。

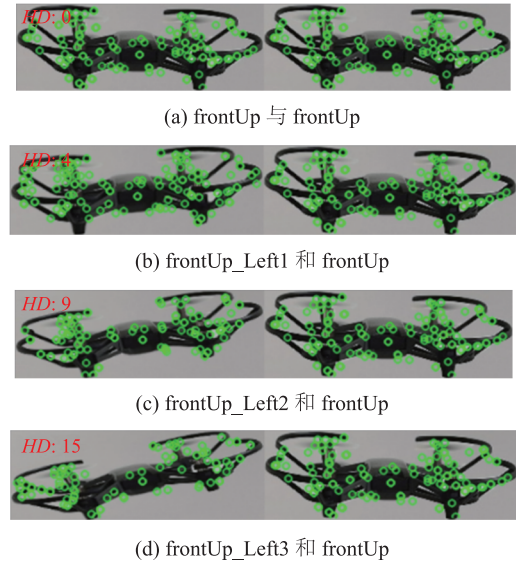


图 7 无人机倾斜程度不同时 Hausdorff 距离的变化情况

Fig. 7 The variation of Hausdorff distance with different degrees of inclination of drones

4 方法验证与分析

实验在 Intel (R) Core (TM) i5-7200U CPU、4 GB 内存、Windows10 操作系统, Pycharm 环境, OpenCV3.4.2 计算机视觉库下实现算法的调试。实验从复杂背景下无人机相似姿态的确定和遮挡情况下无人机显著区域的判断两个步骤分别对算法进行验证。

幼年斑马鱼通过对亲属的气味和颜色纹理信息进行编码记忆, 建立亲属模板数据库。本文仿照此思想制作无人机姿态模板数据集。从目标无人机正前方、左侧前方、右侧前方、上方俯视、下方仰视和侧视等多个角度对无人机的姿态进

行数据集的采集,通过左倾、右倾和不倾斜分类无人机姿态,通过旋转不同角度和镜像翻转等操作丰富模板数据集。实验共制作模板数据集 329 张,其中,无人机姿态模板数据集的部分姿态如图 8 所示。

4.1 复杂背景下无人机相似姿态的确定

在复杂场景下,鹰眼的视觉搜索机制可以实现目标的快速识别,本文基于此思想,结合斑马鱼在受到视觉刺激进行亲属目标识别时的模板匹配过程,确定目标在复杂背景下的区域。在复杂背景下匹配识别无人机目标是确定无人机姿态的关键步骤,直接影响后期姿态判断的精度。为了测试不同复杂背景下的算法性能,选取 3 种背景下的无人机飞行过程。使用特洛无人机分别捕获目标无人机在走廊和树叶背景下的飞行过程。选

取走廊背景(V1)60张、树叶背景(V2)47张和树叶背景(V3)88张。考虑到算法的运行速度,对每张图像的分辨率进行处理,调整为 $720 \text{ pixel} \times 533 \text{ pixel}$ 。图 9 为不同背景下, SIFT 算法检测到的特征点分布。

在上述 3 种背景下,无人机与模板图像匹配的效果和相似姿态的确定如图 10 所示,设置最近邻距离比 ratio 参数为 0.85。确定要匹配的目标后,与姿态模板数据库匹配相似性。即与无人机姿态模板数据集比较计算出的 Hausdorff 距离,距离越小,姿态越相似。确定 3 种背景下的无人机目标图像与模板姿态的相似姿态,目标无人机姿态和依据最小 Hausdorff 距离寻找的无人机相似姿态具有高度相似性,基于仿斑马鱼的模板匹配视觉识别实现不同背景下、不同无人机目



图 8 无人机不同姿态的数据集部分样例

Fig. 8 Some samples of drones' dataset with different postures

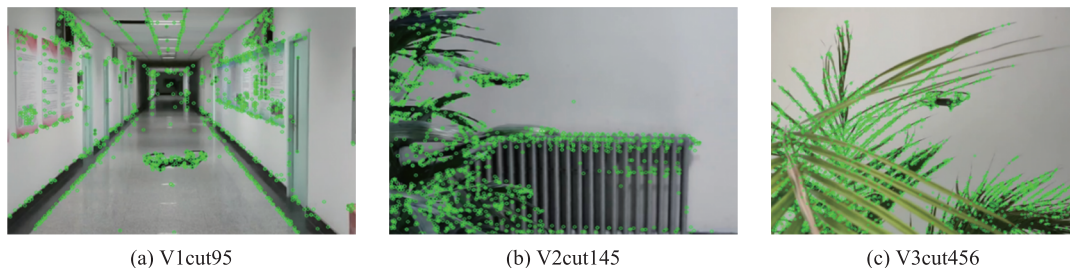


图 9 不同背景下 SIFT 特征点的分布

Fig. 9 Distribution of SIFT feature points under different backgrounds

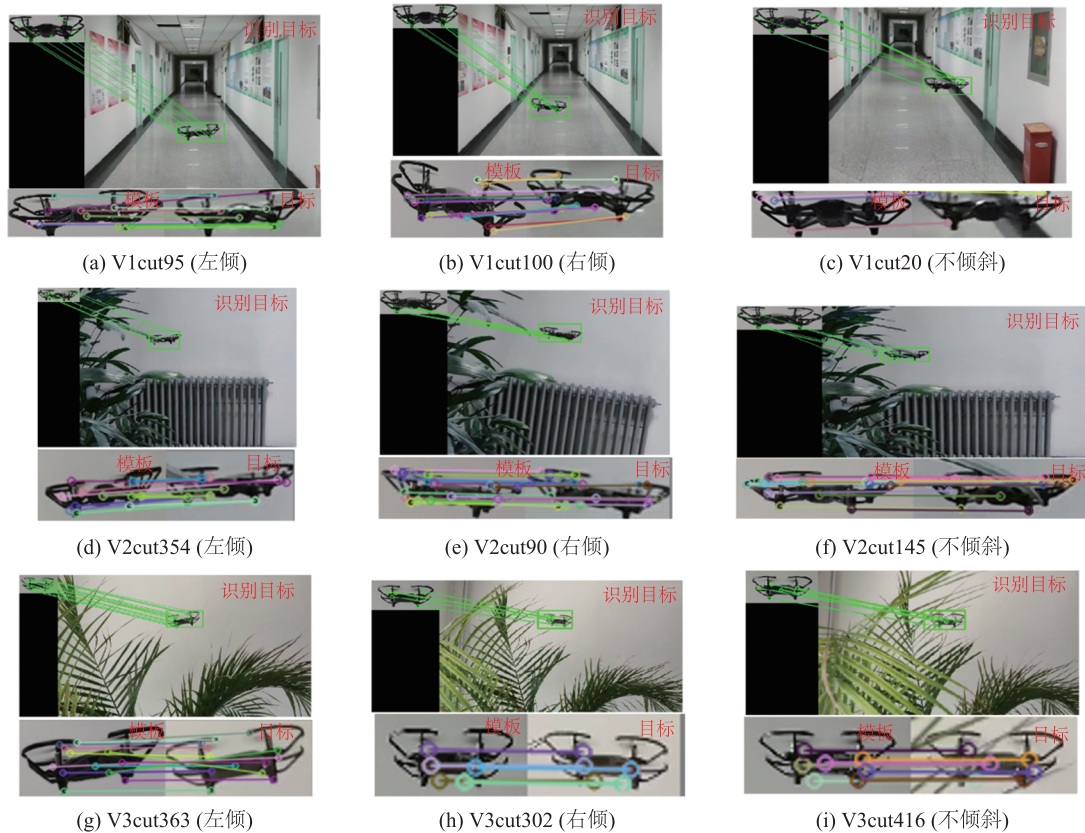


图 10 仿生算法识别不同背景下的无人机

Fig. 10 Biomimetic algorithm recognition of drones in different backgrounds

标姿态的识别。

受斑马鱼成长过程中对亲属模板不断更新的启发, 对无人机姿态模板数据集采取自更新模式。若最相似的无人机姿态计算出的 Hausdorff 距离大于 15, 则说明当前采集到的无人机姿态与模板库中最相似的姿态仍有差距, 将当前目标无人机图像补充至模板库中, 为之后姿态相似的寻找提供更加全面的姿态模板数据集, 提高相似姿态匹配的精度。

基于光谱残差的方法对图像中的目标进行显著性识别检测是一种在空间域快速构造相应显著映射的方法^[25]。哈希相似性通过计算哈希序列的汉明距离比较图像的相似性。图 11 为基于光谱残差的显著目标识别效果和基于差异哈希相似性判断目标无人机的相似姿态。在 V1 背景下, 显著目标检测有较好的识别效果。在 V2 背景下,

当目标被遮挡时, 无法准确全面地检测到显著目标。在更加复杂的 V3 背景下, 无法检测到目标无人机。而且, 检测到的目标无人机图像经差异哈希相似算法与模板数据集计算相似性, 获得的相似无人机姿态模板准确性不高。基于仿斑马鱼模板匹配识别和仿鹰眼视觉机制的算法, 在复杂背景下和目标被遮挡时, 仍有较好的识别性能和准确的姿态相似判断。

本文提出的仿生识别算法的平均运行时间为 0.044 8 s, 基于光谱残差方法的平均运行时间为 0.058 6 s, 平均运行时间提升了 23.5%。从不同背景中选择图像, 两种算法分别实验 36 组图像发现, 仿生识别算法的识别准确率为 88.9%, 光谱残差的识别准确率为 41.7%。采用结构相似指数 (structural similarity index measure, SSIM) 比较两个算法, 确定相似姿态的准确度。SSIM 通过

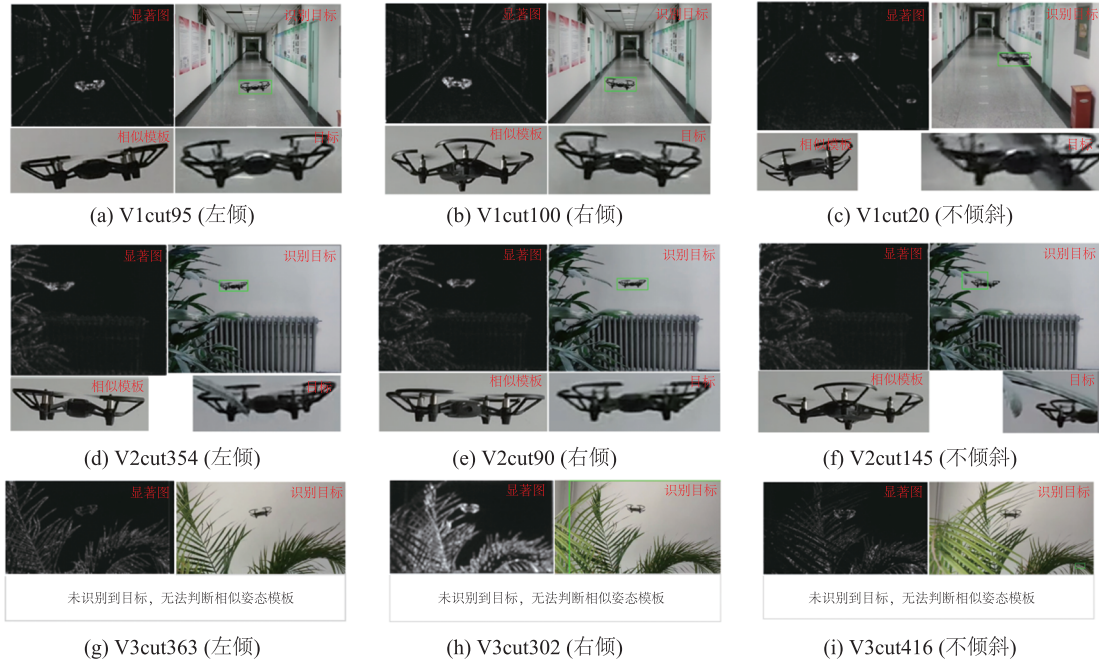


图 11 光谱残差算法识别不同背景下的无人机

Fig. 11 Spectral residual algorithm recognition of drones in different backgrounds

比较两张图像的结构、亮度和对比度等方面的相似程度度量图像之间的相似性，式(10)~(13)为SSIM计算公式。该结果介于 $-1\sim 1$ 之间，越接近1，两张图像越相似。

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (10)$$

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (11)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (12)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (13)$$

其中， $l(x, y)$ 为两张图像的亮度对比函数； $c(x, y)$ 为两张图像的对比度对比函数； $s(x, y)$ 为两张图像的结构对比度函数； $\alpha > 0$ ， $\beta > 0$ ， $\gamma > 0$ ，为可调整的3个函数的权重； μ_x 、 μ_y 为两张图像的平均灰度； σ_x 、 σ_y 为两张图像的标准差， σ_{xy} 为两张图像的协方差； C_1 、 C_2 、 C_3 为常数。

两种算法的识别时间和相似姿态的SSIM的比较结果如表1所示。本文提出的算法在运行效

率和准确度上均优于光谱残差显著性识别算法。

4.2 遮挡情况下的无人机显著区域判断

被遮挡的无人机目标检测识别增加了模板匹配的难度，因遮挡后，目标的特征减少，在识别过程中，容易识别失误。本文提出的基于仿斑马鱼视觉的模板匹配算法在目标被少量遮挡时，仍能够匹配识别到目标。实验选取的遮挡物为树叶。如图12所示，在遮挡程度分别为29%、38%、52%和60%时，使用仿生模板图像匹配算法识别无人机目标，均有较好的匹配识别性能。仿生识别算法能够实现目标受不同程度遮挡时的识别。

当无人机目标被枝叶遮挡时，遮挡的区域会对目标的识别造成干扰。为去除枝叶遮挡区域的干扰，采用基于鹰眼的视觉注意机制对枝叶遮挡区域进行去除。首先对裁剪后的无人机目标区域进行二值化处理，获得含遮挡物和无人机目标的显著图。然后将原图像从彩色空间(RGB)转化到色相、饱和度、明度(HSV)色彩空间。在HSV

表 1 不同算法的时间和效果对比

Table 1 Comparison of time and effectiveness of different algorithms

实验	仿生算法识别时间 (s)	仿生算法 SSIM 值	光谱残差算法识别时间 (s)	哈希算法 SSIM 值
1	0.046 8	0.355	0.062 5	0.358
2	0.046 9	0.448	0.062 5	0.328
3	0.046 8	0.585	0.062 5	0.413
4	0.046 8	0.375	0.046 9	0.267
5	0.031 3	0.473	—	—
6	0.049 9	0.509	—	—

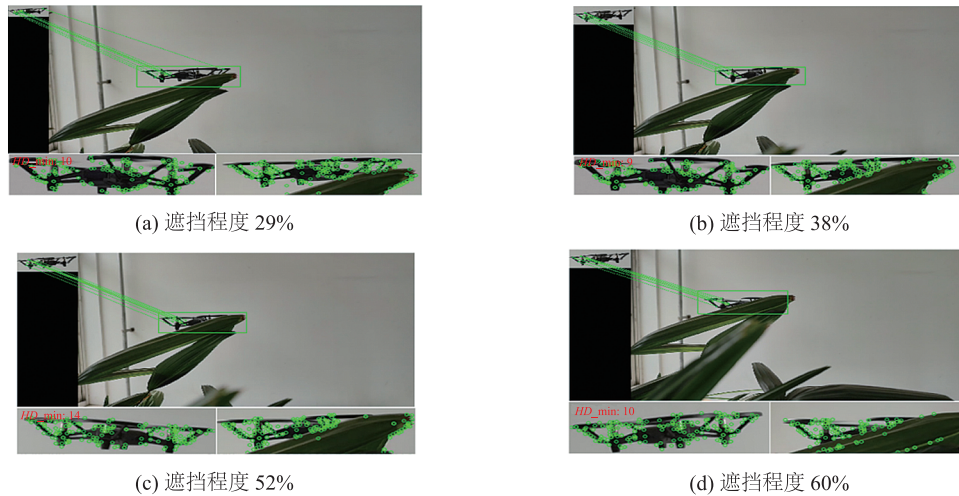


图 12 无人机目标在不同程度遮挡时的匹配识别

Fig. 12 Matching recognition of drone targets under varying degrees of occlusion

色彩空间中, 枝叶遮挡区域的 S 通道更为显著, 故选择对 S 通道进行处理, 以去除遮挡区域。

图 13~16 分别为遮挡程度为 29%、38%、52%、60% 时, 去除图像遮挡区域的过程。去除遮挡后能够更加精确地识别目标, 为精确打击

“黑飞”无人机做准备。

5 结 论

基于仿斑马鱼视觉机制和仿斑马鱼亲属识别

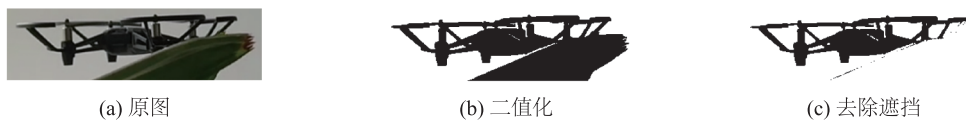


图 13 无人机被遮挡程度为 29%

Fig. 13 The degree of obstruction of drone is 29%

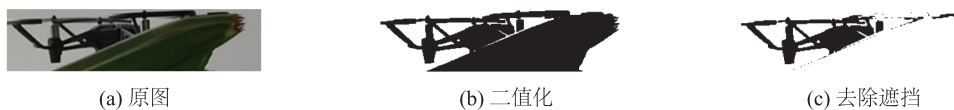


图 14 无人机被遮挡程度为 38%

Fig. 14 The degree of obstruction of drone is 38%

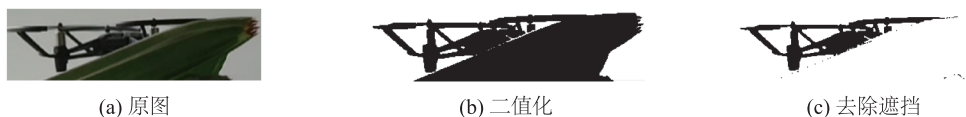


图 15 无人机被遮挡程度为 52%

Fig. 15 The degree of obstruction of drone is 52%

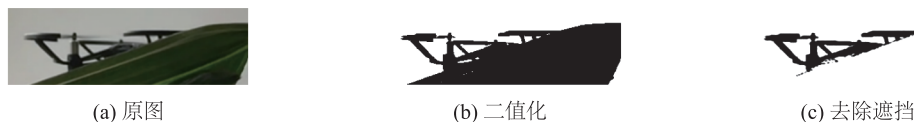


图 16 无人机被遮挡程度为 60%

Fig. 16 The degree of obstruction of drone is 60%

机制，模拟斑马鱼通过视觉和嗅觉印记建立亲属模板数据集，依据亲属模板数据集进行模板匹配识别亲属的视觉机制。本文对无人机姿态建立数据集，并通过模板匹配识别，能够完成在复杂背景下的目标识别，与基于光谱残差的显著性目标识别算法相比，本文提出的仿生识别算法在目标受遮挡时仍能达到识别需求，且在算法平均运行时间上提升 23.5%。针对无人机相似姿态的确定，Hausdorff 距离算法确定相似姿态的结构相似性指数更接近 1。基于仿鹰眼视觉注意机制的识别方法，使无人机目标在受遮挡时的识别显著性更高，能够得到准确性更高的识别效果。未来将继续探索仿生视觉的原理和机制，实现昏暗背景下的目标精确识别。

参 考 文 献

- [1] Kang HG, Joung J, Kim J, et al. Protect your sky: a survey of counter unmanned aerial vehicle systems [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 168671-168710.
- [2] Lowe DG. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60: 91-110.
- [3] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [4] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C] // *Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision*, 2011: 2564-2571.
- [5] Wang F, Ding L. Object recognition and localization based on binocular stereo vision [C] // *Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Control and Intelligent Robotics*, 2022: 196-201.
- [6] 尹磊, 欧勇盛, 江国来, 等. 低成本激光和视觉相结合的同步定位与建图研究 [J]. *集成技术*, 2019, 8(2): 11-22.
Yin L, Ou YS, Jiang GL, et al. Research on simultaneous localization and mapping fusion with low-cost laser sensors and vision [J]. *Journal of Integration Technology*, 2019, 8(2): 11-22.
- [7] Wang M, Wang FK. Remote sensing image mosaic technology based on improved SIFT algorithm [C] // *Proceedings of the International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems*, 2022: 358-365.
- [8] Gao JC, Sun Z. An improved ASIFT image feature matching algorithm based on POS information [J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 7749.
- [9] Zhang T, Liu CJ, Li JQ, et al. A new visual inertial simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithm based on point and line features [J]. *Drones*, 2022, 6(1): 23.
- [10] 卜庆志, 裘君, 胡超. 基于 HOG 特征提取与 SVM 驾驶员注意力分散行为检测方法研究 [J]. *集成技术*, 2019, 8(4): 69-75.
Bu QZ, Qiu J, Hu C. Research on driver's distracted

- behavior detection method based on histogram of oriented gradient feature extraction and support vector machine [J]. *Journal of Integration Technology*, 2019, 8(4): 69-75.
- [11] Duan HB, Xu XB. Create machine vision inspired by eagle eye [J]. *Research*, 2022, (4): 205-209..
- [12] Baden T. Circuit mechanisms for colour vision in zebrafish [J]. *Current Biology*, 2021, 31(12): R807-R820.
- [13] He LY, He YT, Ma L, et al. A theoretical model reveals specialized synaptic depressions and temporal frequency tuning in retinal parallel channels [J]. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2022, 16: 1034446.
- [14] Zhang ZC, Wang SB, Chen J, et al. A bionic dynamic path planning algorithm of the micro UAV based on the fusion of deep neural network optimization/filtering and hawk-eye vision [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(6): 3728-3740.
- [15] Duan HB, Xu XB, Deng YM, et al. Unmanned aerial vehicle recognition of maritime small-target based on biological eagle-eye vision adaptation mechanism [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(5): 3368-3382.
- [16] 张自超, 陈建. 基于双目仿鹰眼视觉与超分辨的果园三维点云重建 [J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022: 1-13. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20220816>.
Zhang ZC, Chen J. A mapping method using 3D orchard point cloud based on hawk-eye-inspired stereo vision and super resolution [J/OL]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2022: 1-13. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20220816>.
- [17] Deng YM, Duan HB. Biological eagle-eye-based visual platform for target detection [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6): 3125-3136.
- [18] 钟勇, 王其鑫, 李雨寒. 基于深度强化学习的欠驱动仿生机器鳗鱼控制研究 [J]. *集成技术*, 2022, 11(4): 44-55.
Zhong Y, Wang QX, Li YH. Research on control of an underactuated bionic robotic eel based on deep reinforcement learning [J]. *Journal of Integration Technology*, 2022, 11(4): 44-55.
- [19] Hinz C, Kobbenbring S, Kress S, et al. Kin recognition in zebrafish, *Danio rerio*, is based on imprinting on olfactory and visual stimuli [J]. *Animal Behaviour*, 2013, 85(5): 925-930.
- [20] Hinz C, Gebhardt K, Hartmann AK, et al. Influence of kinship and MHC class II genotype on visual traits in zebrafish larvae (*Danio rerio*) [J]. *PLoS One*, 2012, 7(12): e51182.
- [21] Fu Q, Wang ST, Wang J, et al. A lightweight eagle-eye-based vision system for target detection and recognition [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(22): 26140-26148.
- [22] 段海滨, 张奇夫, 邓亦敏, 等. 基于仿鹰眼视觉的无人机自主空中加油 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(7): 1450-1458.
Duan HB, Zhang QF, Deng YM, et al. Biologically eagle-eye-based autonomous aerial refueling for unmanned aerial vehicles [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(7): 1450-1458.
- [23] Lindeberg T. Scale-space for discrete signals [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(3): 234-254.
- [24] Huttenlocher DP, Klanderman GA, Rucklidge WJ. Comparing images using the Hausdorff distance [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(9): 850-863.
- [25] Hou XD, Zhang LQ. Saliency detection: a spectral residual approach [C] // *Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007: 1-8.