

# 基于蛙眼 R3 细胞感受野模型的运动滤波方法

李智勇<sup>1</sup> 何霜<sup>1</sup> 刘俊敏<sup>1</sup> 李仁发<sup>1</sup>

**摘要** 视觉感受野 (Visual receptive field) 模型作为生物视觉感知计算的基础单元, 在整个生物视觉信息加工过程中发挥着重要作用. 借鉴具有运动视觉特长的生物感受野特性研究高效的运动视觉计算技术, 是一种潜在可行的方法. 本文基于蛙眼 R3 细胞感受野, 在高斯差分模型 (Difference of Gaussians, DOG) 的基础上引入时间和空间各向异性的运动视觉表达方式, 提出一种基于蛙眼 R3 细胞的不对称各向异性感受野 (Asymmetric anisotropy receptive field, AARF) 模型, 表达蛙类视觉系统对运动目标敏感的视觉时空特征. 基于该运动视觉模型, 进一步提出了一种面向序列图像运动目标分析的蛙眼时空运动滤波算子 (Frog-based spatio-temporal motion filter, FSTMF), 以实现运动目标准确检测与分析. 实验结果表明, 该方法具有使序列图像背景模糊、动态目标突显的滤波效果, 既符合蛙眼视觉背景模糊而前景清晰的特性, 也为下一步运动目标的准确检测实现了高效的预处理.

**关键词** 蛙眼视觉特性, 不对称各向异性, 感受野模型, 蛙眼时空运动滤波分析

**引用格式** 李智勇, 何霜, 刘俊敏, 李仁发. 基于蛙眼 R3 细胞感受野模型的运动滤波方法. 自动化学报, 2015, 41(5): 981–990

**DOI** 10.16383/j.aas.2015.c140810

## Motion Filtering by Modelling R3 Cell's Receptive Field in Frog Eyes

LI Zhi-Yong<sup>1</sup> HE Shuang<sup>1</sup> LIU Jun-Min<sup>1</sup> LI Ren-Fa<sup>1</sup>

**Abstract** As a basic unit of biological visual perception computing, the visual receptive field plays a significant role in the whole process of biological visual information processing. It is a potentially feasible method for further study of efficient computing technology based on motion visual characteristic from biological receptive field. Inspired by frog eye's R3 cell receptive field, this study introduces a spatio-temporal anisotropy motion visual presentation to the difference of Gaussians (DOG) model. Thus, an asymmetric anisotropy receptive field (AARF) model is presented. This model can express frog visual system's spatio-temporal characteristic which is sensitive to moving visual targets. Based on the motion visual model, a frog-based spatio-temporal motion filter (FSTMF) is further proposed, which aims at accurate moving object detection and analysis in sequential images and videos. The experimental results demonstrate that the proposed method can obscure the background and highlight the moving targets. It is in accordance with frog eye's vision features with background vagueness and foreground clearness. Meanwhile, the filtering method can be as efficient pre-processing for accurate detection of moving objects.

**Key words** Frog visual characteristic, asymmetric anisotropy, receptive field model, frog-based spatio-temporal motion filter (FSTMF)

**Citation** Li Zhi-Yong, He Shuang, Liu Jun-Min, Li Ren-Fa. Motion filtering by modelling R3 cell's receptive field in frog eyes. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(5): 981–990

视觉系统作为生物体获取外界信息的重要渠道,

对亮度、颜色、形状、运动以及立体视觉等外界信息的处理能力是目前计算机系统无法比拟的. 为了提高机器视觉水平, 研究者们试图从生物视觉机制中寻求突破. 因此, 借鉴一些具有视觉特长的生物学视觉认知机理, 从根本上研究运动视觉认知计算的新模型, 探索目标检测、运动估计及目标跟踪中的新方法具有非常重要的意义.

视觉系统中, 直接或间接刺激到某一特定神经细胞的光感受器的全体即为该特定神经细胞的感受野 (Visual receptive field)<sup>[1]</sup>, 感受野作为视觉特征提取的基本单元, 贯穿于各级视觉神经元, 在整个视觉信息加工过程中发挥着重要的作用. 沿着视觉信息的传递通路, 神经细胞的感受野在不同的层次表现出不同的特性. 经过感受野的逐级提取, 视觉系统逐渐将不重要的信息剔除, 从而提取关键信息, 以实

收稿日期 2014-11-25 录用日期 2015-01-19  
Manuscript received November 25, 2014; accepted January 19, 2015

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA01A301-01), 国家自然科学基金 (91320103), 广东省省部产学研结合项目 (2012A090300003), 广东省科技计划项目 (2013B090700003) 资助  
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA01A301-01), National Natural Science Foundation of China (91320103), Special Project on the Integration of Industry, Education and Research of Guangdong Province (2012A090300003), and Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2013B090700003)

本文责任编辑 贾云得  
Recommended by Associate Editor JIA Yun-De  
1. 湖南大学信息科学与工程学院嵌入式与网络计算湖南省重点实验室长沙 410082  
1. College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Embedded and Network Computing Key Laboratory in Hunan Province, Changsha 410082

现感知、识别等视觉任务。根据视觉神经元感受野的区域和作用,感受野可分为经典型与非经典型两类,且两者之间相互调制。

青蛙见动不见静的独特视觉行为启发科研工作者对其视觉特性进行探索,并在神经生物学机理研究以及视觉行为机制模拟方面取得了重大进展。早期关于蛙眼视觉神经系统的研究主要集中在神经生物学机理方面,20世纪80年代后,随着神经网络的发展和流行,在原有研究基础上开始了对青蛙视觉行为机制的模拟研究。Lee<sup>[2]</sup>提出了一种基于蛙眼视网膜的神经网络模型;日本学者Nishio等<sup>[3]</sup>基于蛙眼视觉系统设计了二维网络模拟电路用于目标检测;赵亮等<sup>[4]</sup>分析了青蛙视觉行为并进行了相关计算机模拟。针对复杂环境下运动目标的检测与分析,少数研究者开始尝试研究蛙眼视觉机理启发的计算模型与方法,王智灵等<sup>[5]</sup>利用蛙眼视觉认知的生理特性和外部特性,提出了一种与之相应的模糊化区域理解的运动目标跟踪方法。然而,目前该领域大多数研究主要集中于对蛙眼视觉机理与视觉神经机制的研究,以及在对青蛙视觉行为机制的电子模拟应用,对于蛙眼视觉特性的计算机视觉理论描述和数学表达还不十分完善,基于此的运动目标视觉计算模型与方法研究成果尚不多见。研究蛙眼的感受野特性,模拟其对运动信息的处理机制有助于解决运动目标分析中的相关问题。

感受野作为视觉信息处理的基本单元,其大小、中心位置、调制强度、空间频率等特性并非一成不变,而是会随着刺激的不同动态变化。动态感受野的研究在理论上打破了把感受野当成固定神经结构的观念,而要将其看成会随着时间变化的系统。近年来,感受野的动态特性愈发受到相关研究人员的重视,如:Xiao等<sup>[6]</sup>在Gabor函数的基础上,提出了一种具有可变参数的动态感受野模型用来解释视觉不变性。一些视觉机制也因动态特性的发现得到更好的解释,如:Zhang<sup>[7]</sup>提出了一种基于感受野模型的视觉显著性提取方法,因而也为基于视觉机制的图像处理技术研究提供了更为广阔的思路。目前感受野的动态特性已广泛应用于图像处理方面,如:Ekvall等<sup>[8]</sup>提出了一种新颖的感受野表达的目标检测方法;Perez等<sup>[9]</sup>提出了一种包含受生物启发感受野的前向神经网络,以增强模式识别的性能;Yang等<sup>[10]</sup>在感受野假说的基础上,提出一个考虑空间距离的图像建模方法,并在图像能量函数中引入保守因子来提高分割的准确性;Lee等<sup>[11]</sup>在感受野加权回归的理念上,提出了一种新颖的评价器。然而,目前的研究大部分是关于一般性视觉系统的神经机理与视觉模型,对于运动视觉的感受特性研究较少。

本文基于蛙眼视觉特性,将时间信息和空间信

息加入静态高斯差分模型的基础上,提出一种基于蛙眼R3细胞的不对称各向异性感受野(Asymmetric anisotropy receptive field, AARF)模型,并基于该感受野模型进一步提出了一种蛙眼时空运动滤波算子(Frog-based spatio-temporal motion Filter, FSTMF),可应用于序列图像运动目标分析。实验结果表明,该时空滤波算子比其他滤波算子能更好地突显运动目标,符合蛙眼感知的背景模糊、前景清晰的视觉特性,并具有较好的运动视觉计算效率。

## 1 蛙眼不对称各向异性感受野模型

青蛙在视网膜阶段具有相对高效的视觉信息处理与过滤功能,蛙眼视网膜上所分布的神经元能够对给光(ON)和撤光(OFF)刺激发生响应,分别对应超极化和去极化通道。蛙眼视觉系统主要在T5神经元上完成猎物与敌害的判断,而视网膜上的R3神经节细胞作为T5神经元的主要输入,在猎物与敌害判断中发挥着至关重要的作用。

过去几十年来,科学家对R3神经节细胞进行了大量研究。Lettvin等<sup>[12]</sup>指出R3细胞具有ON-OFF型感受野,能够响应瞬间变化的给光和撤光刺激,而对于静止的目标不会产生响应。同时部分R3细胞对运动方向、凸边、反差等具有选择性。蛙眼视网膜中R3神经节细胞对运动刺激的响应可以通过其感受野的空间结构与时间特性来解释,神经元的兴奋性感受野(Excitatory receptive field, ERF)与抑制性感受野(Inhibitory receptive field, IRF)通常为中心对称结构,如图1(a)所示。近年来,Hoshino等<sup>[13]</sup>研究发现R3细胞存在不对称的感受野结构,如图1(b)所示,其ERF与IRF区域的中心是不重叠的,当刺激从不同方向进入呈不对称结构的R3神经节细胞感受野时,所引起的反应也具有不对称性。基于上述特点,将R3细胞作为建模对象,分析其在运动检测过程中的刺激响应特性和机制,有助于解决实际应用中的运动目标分析问题。

感受野数学模型的研究一直是探索视觉信息加工原理的重要途径。无论是经典模型还是非经典模型的建立、改进及完善,其目的都是为了更好地描述某种生物视觉信息处理系统的生理机制,以便更好地运用于实际。目前关于感受野模型的研究通常是兴奋性感受野与抑制性感受野组成的中心对称型结构,如DOG<sup>[1]</sup>函数模型、Gabor函数模型<sup>[14]</sup>、LOG函数模型<sup>[15]</sup>。这些模型能较好地描述动物对输入图像的端点、边缘、线段、角度、方位等空间特征感知和认知机制,成为Marr视觉理论<sup>[16]</sup>的数学基础,但却不适用于运动目标分析计算。本文从蛙眼视觉生理特性出发,提出运动感知的蛙眼感受野模型。

基于上述生物学发现与研究成果,本文在静态高斯差分模型的基础上加入时间信息和空间各向异

性信息, 提出一种基于蛙眼视觉特征的“不对称各向异性感受野模型”(AARF), 具体定义如下:

$$F(x, y, \theta, t) = A_1 K(t) G(x, y, \theta) - A_2 K(t + d_t) G(x, y, \theta) = \frac{A_1 K(t)}{2\pi\sigma_{u1}\sigma_{v1}} \exp\left[-\left(\frac{u_1^2}{2\sigma_{u1}^2} + \frac{v_1^2}{2\sigma_{v1}^2}\right)\right] - \frac{A_2 K(t + d_t)}{2\pi\sigma_{u2}\sigma_{v2}} \exp\left[-\left(\frac{u_2^2}{2\sigma_{u2}^2} + \frac{v_2^2}{2\sigma_{v2}^2}\right)\right] \quad (1)$$

小, 具体表达式如下:

$$K(t) = \begin{cases} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma_t^2}\right), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

模型中  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\lambda_t$ 、 $d_t$ 、 $\sigma_{u1}$ 、 $\sigma_{v1}$ 、 $\sigma_{u2}$ 、 $\sigma_{v2}$  和  $\theta$  分别代表不同的参数, 调整这些参数可表示不同运动视觉特征的蛙眼感受野模型:

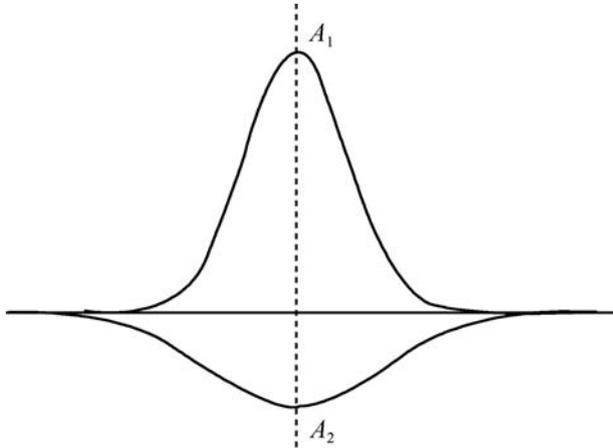
1)  $A_1$ 、 $A_2$ : ERF 和 IRF 权重, 如图 1 所示, 分别表示 ERF 和 IRF 视觉反差检测敏感度, 调整  $A_1$  和  $A_2$  可模拟对不同程度的视觉反差感知, 多次实验证明  $A_1/A_2$  的取值范围为 2~4 为宜, 实验中取  $A_1/A_2 = 3$ .

2)  $\lambda_t$ 、 $d_t$ : 时间参数,  $\lambda_t$  为时间常量参数, 取值范围为 3~8 为宜, 实验中取经验值 5;  $d_t$  表示 IRF 相对 ERF 的时间延迟,  $\gamma = \lambda_t d_t$  则表示 IRF 区域相对 ERF 区域的中心点偏移极坐标距离, 体现了感受野模型的不对称性,  $\gamma$  与  $\theta$  联合决定了 IRF 区域的中心点欧氏坐标  $(\gamma \cos \theta, \gamma \sin \theta)$ , 调整时间延迟参数  $d_t$  可模拟对运动速度敏感的程度. 当  $d_t = 0$  时, 代表感受野模型是对称各向异性的; 当  $d_t \neq 0$  时, 代表感受野模型是不对称各向异性的. 事实上, 该参数的设定与视频采样频率以及待检测目标运动速度相关, 对于采样频率高、运动速度慢的目标该参数设定略大, 反之亦然. 本文所提出的模型是不对称各向异性感受野模型, 在处理中等采样率的视频序列中车辆行人等中等速度的运动目标时,  $d_t$  的取值范围为 1~5 为宜.

3)  $\sigma_{u1}$ 、 $\sigma_{v1}$ 、 $\sigma_{u2}$ 、 $\sigma_{v2}$ : 各向异性空间结构参数,  $\sigma_{u1}$  和  $\sigma_{v1}$  分别表示 ERF 区二维椭圆高斯函数在长轴和短轴方向的均方差,  $\sigma_{u2}$  和  $\sigma_{v2}$  分别表示 IRF 区二维椭圆高斯函数在长轴和短轴方向的均方差, 椭圆长度的不一致性体现了感受野模型各向异性, 调整各向异性结构参数  $\sigma_{u1}$ 、 $\sigma_{v1}$ 、 $\sigma_{u2}$ 、 $\sigma_{v2}$  可模拟蛙眼对运动凸边的敏感性.

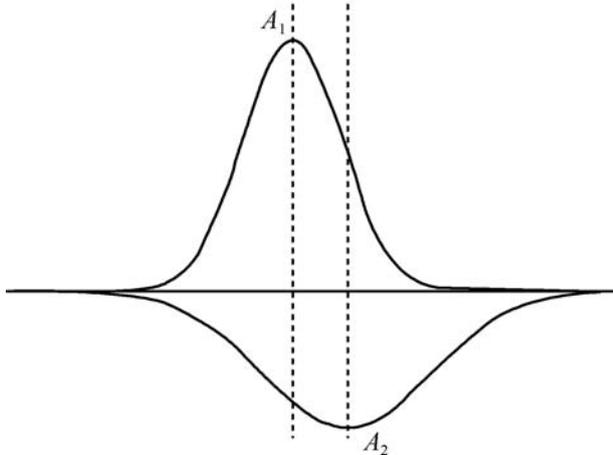
4)  $\theta$ : 各向异性的方向角度参数, 对应了该感受野模型对不同方向的目标边缘检测敏感方位, 模拟了蛙眼 R3 细胞对运动目标边缘方向的选择性响应. 事实上, 蛙眼中存在很多具有不同敏感方向的 R3 细胞, 其中各向异性感受野的长轴垂直于给定的目标边缘方向的细胞, 可以得到较清晰的边缘信息. 这里不对称各向异性感受野模型模拟了蛙眼视觉对运动目标的方向感受敏感性.

对于运动目标而言, 与该目标运动同向的边缘信息变化较大, 各向异性蛙眼感受野长轴垂直于该方向将获得较大的凸边差分滤波检测结果. 因此, 该感受野函数可以模拟蛙眼对运动目标凸边信息敏感的特性, 具体自适应滤波方法将于下面章节详述.



(a) 普通感受野结构 (ERF 与 IRF 中心重叠)

(a) The construct of common receptive field (center for ERF and IRF overlap)



(b) 不对称感受野结构 (ERF 与 IRF 中心不重叠)

(b) The construct of asymmetric receptive field (center for ERF and IRF does not overlap)

图 1 蛙眼 R3 神经节细胞的感受野结构

Fig. 1 The receptive field structure of frog eye's R3 ganglion cells

其中,  $\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ ,  $\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - \gamma \cos \theta \\ y - \gamma \sin \theta \end{bmatrix}$ ,  $\gamma = \lambda d_t$ .  $K(t)$  为时间指数冲击响应函数, 其响应特性取决于运动刺激的大

## 2 基于蛙眼感受野模型的时空滤波算子

基于蛙眼视觉特性的不对称各向异性感受野模型模拟了蛙眼视网膜神经节细胞感受野的时间和空间特性, 比如 IRF 相对 ERF 的响应延迟、感受野的方向选择性等. 这些性质决定了感受野模型的时空不可分特性. 近年来, 图像滤波算法<sup>[17-18]</sup> 备受研究者们的关注. 本文结合蛙眼 AARF 模型的时间和空间上的连续性, 进一步提出一种面向图像序列的运动目标视觉分析的蛙眼时空滤波算子 (FSTMF).

由于蛙眼感受野主要对运动刺激产生响应, 且 IRF 相对 ERF 具有时间上的延迟, 感受野模型中时域信息  $K(t)$  的引入, 可用来实现对运动区域与静止区域的自适应滤波. 为了能够既保持显著动态区域边缘又实现背景区域的模糊化, 本文通过对序列图像局部时空特性的非线性组合, 自适应地滤波. 对图像帧  $I_t(x, y)$  进行滤波可表示为

$$\hat{f}_t(x, y) = \frac{\sum_{i=-w_s}^{+w_s} \sum_{j=-w_s}^{+w_s} I_t(x+i, y+j) W_t(x+i, y+j)}{\sum_{i=-w_s}^{+w_s} \sum_{j=-w_s}^{+w_s} W_t(x+i, y+j)} \quad (3)$$

其中,  $\hat{f}_t(x, y)$  是滤波输出图像, 空间滤波邻域窗口大小为  $(2w_s + 1)(2w_s + 1)$  个像素. 权函数  $W_t$  为前文所提出的感受野模型  $F$  (见式 (1)).

感受野模型主要由高斯函数组成, 因而各参数的确定决定其是否能够有效应用. 对于滤波模型尺度参数  $\sigma$  的确定, 研究者们提出了许多自适应多尺度方法. 其中 Comsweet 等依据人眼视网膜侧向刺激特性所提出的独立强度传播模型较为简单, 能够用于解释人类视觉中的马赫带效应、Ricco 定律以及 Weber 定律, 其尺度定义如下:

$$\sigma^2(x, y) = \frac{1}{I(x, y)} \quad (4)$$

式中,  $x, y$  表示位置坐标.  $I(x, y)$  表示图像灰度, 其值归一化为  $[0, 1]$  区间.

为了设计具有自适应时间 (运动) 特性的滤波器, 本文在式 (2) 中引入具有时域属性的参数, 以确定时域滤波尺度  $\sigma_t$ , 具体表达式为

$$\sigma_t^2(x, y) = \frac{1}{|f_t(x, y)|} \quad (5)$$

其中,  $f_t(x, y)$  为  $t$  时刻  $(x, y)$  位置的图像灰度时域差分, 即  $f_t(x, y) = I_t(x, y) - I_{t-d_t}(x, y)$ , 其值归一化为  $[0, 1]$  区间.

为简化计算, 在设计各向异性高斯滤波器时, 采用式 (4) 确定滤波器长轴的尺度  $\sigma_u$ . 由高斯滤波器特性, 对于非边缘像素点, 其像素邻域较平滑时, 滤

波计算后图像的边缘方向差异小, 可设计长轴  $\sigma_u$  与短轴  $\sigma_v$  的比例接近于 1; 而对于边缘点像素, 滤波器则呈边缘切线状, 此时  $\sigma_u$  与  $\sigma_v$  的比例接近于 0, 其高斯滤波器各向异性方向参数  $\theta$  与边缘切线状同向. 因此, 长短轴的比例根据图像区域的平滑度可以通过灰度方差来自适应确定, 将长短轴比例定义为  $R = k/(k + D_w(x, y))$ , 即得到短轴表达式为

$$\sigma_v = R \times \sigma_u \quad (6)$$

其中,  $k$  为比例因子.  $D_w(x, y)$  为像素点  $(x, y)$  在其邻域窗口  $W$  内的灰度局部均方差, 具体表达式为

$$D_w(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_t(i, j) - \bar{I}_t(x, y))^2 \quad (7)$$

式中,  $MN$  为邻域窗口  $W$  的大小,  $\bar{I}_t(x, y)$  为窗口内的灰度均值,  $I_t(i, j)$  和  $\bar{I}_t(x, y)$  的取值区间为  $[0, 255]$ . 同时考虑到长轴方向与边缘方向一致时, 图像边缘模糊度最大, 而当其垂直于边缘方向时, 边缘模糊度较小, 且涉及的边缘点较多, 因而有利于边缘的保持.

依据以上方法设计的自适应不对称各向异性感受野滤波函数  $F$ , 具有如下特点: 一方面, 自适应的各向异性空间结构参数  $\sigma_u$  与  $\sigma_v$  使得该滤波函数具有较好的目标边缘部分增强、平滑部分模糊化的效果; 另一方面, 不对称性时间参数  $\sigma_t$  使得该滤波函数具有较好的运动目标尺度放大、静止背景尺度减小的效果. 因此, 二者效应叠加, 模拟实现了蛙眼对运动目标边缘敏感的视觉特性, 同时也给后续的运动目标检测与识别建立了滤波预处理基础.

此外, 由于运动目标具有运动方向性, 根据以上滤波算子的计算结果, 可以初步估计目标运动信息. 依据式 (5), 与目标运动同向的边缘点由于多帧重叠效应, 其邻近帧的差异较小; 相反, 与目标运动方向垂直的边缘点多帧间的差异明显, 滤波处理后具有更大的梯度信息能量. 因此以上滤波算子在目标不同边缘位置的计算结果差异与其运动的尺度和方向相关, 据此可以初步估计目标的运动方向. 如果能预先估计目标的运动尺度与方向, 选择恰当的时间常数  $d_t$ , 实时计算中优先保持滤波函数的各向异性方向角度参数  $\theta$  与目标运动方向垂直, 尽可能保留运动目标的边缘能量分布, 更有利于运动目标的检测与识别.

综上所述, 滤波模型尺度参数  $\sigma_u$ 、 $\sigma_v$  与  $\sigma_t$  在图像的各个位置上都有可能不同, 所得到的滤波器形状是自适应变化的, 同时预估目标运动特性设计合适的参数  $d_t$  与  $\theta$  也是很重要的.

## 3 实验结果与分析

评价一个生物视觉模型的好坏, 不仅要看它是

否符合生物视觉系统的生理结构特点,更重要的是要看它能否更准确地反映出真实可靠的视觉信息,本文主要关注序列图像中的运动信息. 本文实验在 Matlab 环境下进行,其实验对象为经典视频库中的视频序列. 实验验证了所提出的基于运动目标视觉分析的蛙眼时空滤波算子能较好地突出运动目标并模糊背景区域,并通过 EME (A measure of enhancement) 指标和信噪比 (Signal to noise ratio, SNR) 指标说明了其优越性. 经预处理后的运动目标检测实验结果验证了提出的时空滤波方法的有效性. 下面从定性和定量两个方面来分析实验结果.

### 3.1 定性分析

本节展示了本文所提出的时空滤波方法在不同视频序列上的滤波结果,并在本文方法处理后的序列上进行运动目标的检测. 其结果证明了本文滤波方法对运动目标的检测实现了有效的预处理.

#### 3.1.1 滤波结果

基于以上的视觉运动滤波模型,采用 ViSOR 视频监控数据库中的 ViSOR-Video00 视频序列、IPPR 竞赛运动分割数据集中的 data1 以及 SampleVideo 序列进行测试. ViSOR-Video00 共

2755 帧,每一帧的分辨率为  $432 \times 540$ ,相应时空滤波结果如图 2 所示. IPPR-data1 共 300 帧,每一帧的分辨率为  $320 \times 240$ ,相应时空滤波结果如图 3 所示. SampleVideo 共 80 帧,每一帧的分辨率为  $360 \times 240$ ,相应时空滤波结果如图 4 所示.

从实验图像 2~4 中可以看到,视频序列中的运动目标得到了较好的凸显,同时也模糊了背景区域. 图 5 列举了本文时空滤波方法在特殊图像下的处理结果,其中左边是对静止图像的滤波结果,可见本文所提出的滤波方法能够很好地模糊背景;右边的图像包括多个运动目标,从滤波结果可见,本文方法在模糊背景信息的同时较好地突出了多个运动目标. 图 6 给出了采用 ViSOR-Video00 测试不同滤波方法的结果,从左至右依次为第 2050 帧的灰度图像以及采用传统高斯滤波、DOG 滤波、传统空域双边滤波和本文时空滤波方法进行滤波的结果. 从实验图像中可以看出,高斯滤波和 DOG 滤波方法在平滑图像的同时也模糊了图像细节,传统空域双边滤波方法能够很好地增强图像的整体对比度,但是不能突出运动前景目标. 而本文提出的蛙眼时空滤波方法在模糊背景区域的同时能够有效地凸显具有运动特性的目标,特别是运动目标的边缘特征.

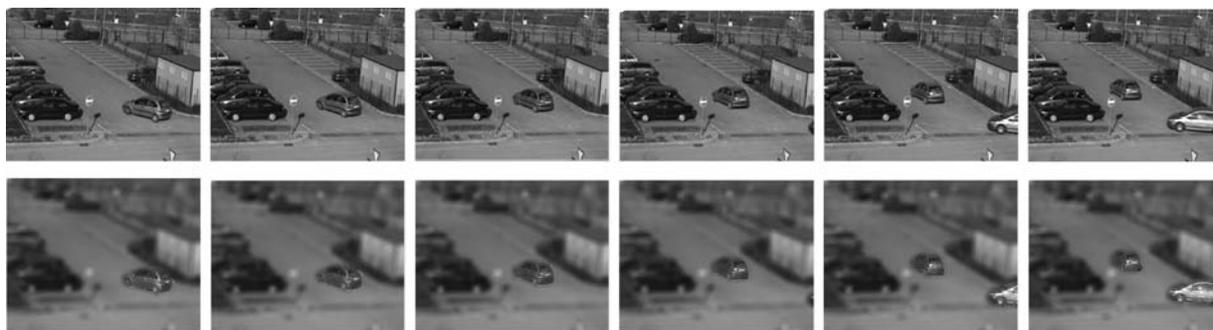


图 2 ViSOR-Video00 时空滤波结果 (从左至右依次为第 600, 610, 620, 630, 640, 650 帧)

Fig. 2 The space-time filtering results of ViSOR-Video00 (From left to right are the 600th, 610th, 620th, 630th, 640th, 650th frame successively.)



图 3 IPPR-data1 时空滤波结果 (从左至右依次为第 100, 110, 120, 130, 140, 150 帧)

Fig. 3 The space-time filtering results of IPPR-data1 (From left to right are the 100th, 110th, 120th, 130th, 140th, 150th frame successively.)

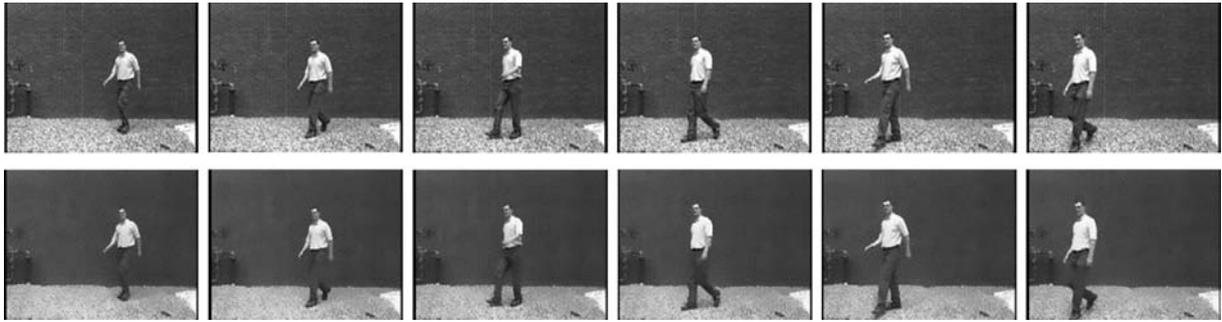


图4 SampleVideo 时空滤波结果 (从左至右依次为第 30, 40, 50, 60, 70, 80 帧)

Fig. 4 The space-time filtering results of SampleVideo (From left to right are the 30th, 40th, 50th, 60th, 70th, 80th frame successively.)



图5 特殊情况下的时空滤波结果 (左边为静止图像, 右边为多运动物体图像)

Fig. 5 The space-time filtering results in special situations (The processing result of static image is on the left, the processing result of multi-moving targets is on the right.)



图6 ViSOR-Video00 中第 2050 帧不同滤波方案结果 (图片依次为灰度图像和高斯滤波、DOG 滤波、传统空域双边滤波、本文时空滤波结果)

Fig. 6 The results of different filtering methods of the 2050th frame in ViSOR-Video00 (The gray image and Gaussian filtering, difference of Gaussian filtering, traditional airspace bilateral filtering, the proposed space-time filtering result are shown successively.)

### 3.1.2 运动目标检测结果

为了验证本文提出的时空滤波方法的有效性, 该部分在未经预处理和预处理后的视频序列上进行运动目标的检测<sup>[19]</sup>. 图 7 是视频序列 ViSOR-Video00 用帧差法<sup>[20]</sup> 检测运动目标的对比实验结果, 可见用本文时空滤波方法预处理后的视频序列能够更好地检测出运动目标. 且检测出来的目标轮廓更加清晰, 目标的完整性相对更好, 目标内部的空洞也比未经预处理所得的目标大量减少. 由此可见, 本文方法对运动目标的检测实现了有效的预处理.

### 3.2 定量分析

为了验证基于蛙眼感受野模型的时空滤波的有效性, 本节分析了所提出的时空滤波方法的计算效

率, 并采用图像增强效果和图像信噪比来对所提出的模型进行定量分析.

#### 3.2.1 计算效率分析

为了证明本文方法的实时性, 表 1 对比了空域双边滤波、高斯滤波和本文时空滤波的处理时间. 从表 1 中可以看出这三种滤波方法的处理与图像的尺寸成正相关的关系, 即图像尺寸越大, 处理一帧所需要的时间就越长. 对比三种滤波方法的处理时间可知, 空域双边滤波的处理时间最长 (平均 0.8193 秒/帧), DOG 滤波次之 (平均 0.7913 秒/帧), 高斯滤波第三 (平均 0.7649 秒/帧), 本文的时空滤波方法 (平均 0.5539 秒/帧) 处理一帧图像的时间最短. 由此可见, 本文所提出的时空滤波方法相对而言实时性较优.

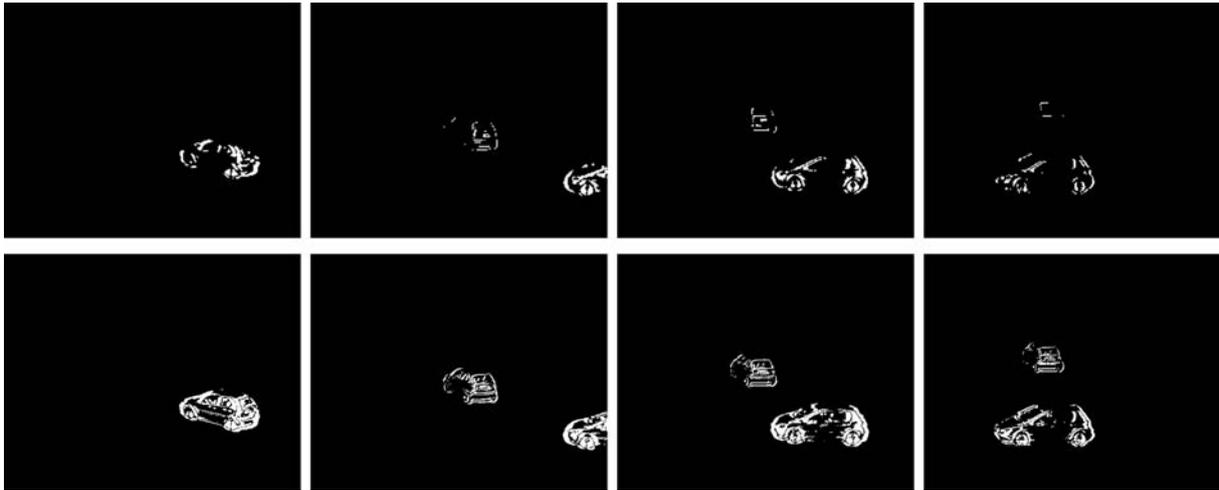


图 7 序列 ViSOR-Video00 第 15、54、80、108 帧检测结果对比 (第一行为未经预处理的检测结果, 第二行为本文方法预处理后的检测结果)

Fig. 7 The detection results of the 15th, 54th, 80th, 108th frame in ViSOR-Video00 (The first row are the detection results of sequence without pretreatment, the second row are the detection results of sequence with the proposed pretreatment method.)

表 1 不同滤波方法处理时间 (秒/帧)

Table 1 The processing time with different filtering methods (second/frame)

视频 (图像尺寸)	空域双边滤波	DOG 滤波	高斯滤波	本文时空滤波
ViSOR-Video00 (432 × 540)	0.8903	0.8523	0.8163	0.6273
IPPR-data1 (320 × 240)	0.7653	0.7206	0.6954	0.4521
SampleVideo (360 × 240)	0.8029	0.8010	0.7832	0.5824
平均处理时间	0.8193	0.7913	0.7649	0.5539

### 3.2.2 图像增强效果分析

本文采用 Agaian 等<sup>[21]</sup> 改进的评价指标 EME 对序列图像的滤波增强效果进行分析, 即将图像  $I$  分成  $n_1 \times n_2$  个大小相同的局部图像, 求取每一部分的最小像素值  $V_{\min,i,j}$  和最大像素值  $V_{\max,i,j}$ . 具体定义如下:

$$EME = -\frac{1}{n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} 20 \ln \frac{V_{\max,i,j} - V_{\min,i,j}}{V_{\max,i,j} + V_{\min,i,j} + c} \quad (8)$$

式中,  $c$  为防止分母为零的小常数. 本文选取的局部图像为  $8 \times 8$ , 采用传统空域双边滤波和本文时空滤波方法对第 3.1 节中的三个视频序列进行滤波增强, 相应的灰度图像和各种方法的 EME 指标对比结果如图 8 所示.

从图 8 中可以看出, 增强后图像的 EME 值都要高于原始图像. EME 值越大, 图像对比度提升越高, 增强效果越好. 表 2 显示了各视频序列经过不同方法处理后的 EME 指标相对灰度图像 EME 指标所改进的百分比, 可见本文所提出的时空滤波方法 EME 指标改进的百分比要大于空域双边滤波方法.

所以, 基于本文时空滤波增强方法的 EME 相对传统空域双边滤波方法具有一定优势, 说明其在图像对比度和清晰度的提升上优于传统空域双边滤波.

### 3.2.3 图像信噪比分析

由于常用的图像峰值信噪比 (Peak signal to noise ratio, PSNR) 评价指标涉及到原始图像和处理后图像的信息, 本文采用图像信噪比 (SNR) 评价指标对单一图像进行客观评价. 该方法仅用到图像自身信息, 具体定义如下:

$$SNR = -10 \lg \frac{E}{\sigma^2} \quad (9)$$

式中,  $E$  表示有用的图像信息, 取图像中所有点的像素均值.  $\sigma$  表示图像噪声, 为所有点的像素值标准差. 采用传统空域双边滤波和本文时空滤波方法对第 3.1 节中三个视频序列进行滤波, 相应的灰度图像和各种方法的 SNR 指标的统计结果对比如表 3 所示.

从表 3 可以看出, 增强后图像的 SNR 值都要低于原始图像. 这是由于滤波过程中, 增强图像边缘和轮廓等有用信息的同时也增强了噪声. 从多帧图像的统计实验结果可以看出, 基于本文时空滤波增强

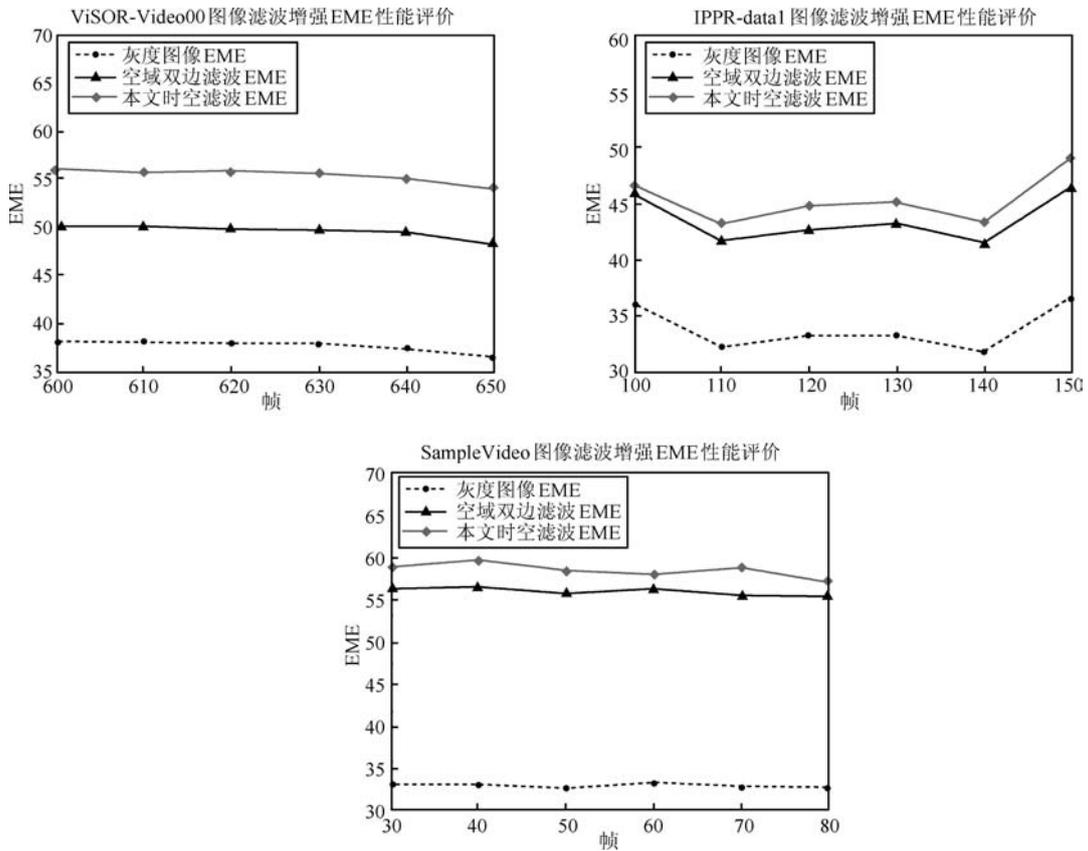


图 8 图像滤波增强 EME 性能评价

Fig. 8 Image filter enhance EME performance evaluation

表 2 不同方法 EME 值相对灰度图像滤波增强百分比 (%)

Table 2 Different methods EME filtering enhancement relative to gray image percentage (%)

视频	空域双边滤波	本文时空滤波
ViSOR-Video00	31.66	46.80
IPPR-data1	28.61	34.00
SampleVideo	69.85	77.61
平均值	43.37	52.80

表 3 不同视频序列图像滤波增强 SNR 性能评价

Table 3 Image filter enhance SNR performance evaluation in different sequences

视频 (图像尺寸)	帧数	灰度图像 (均值/方差)	空域双边滤波 (均值/方差)	本文时空滤波 (均值/方差)
ViSOR-Video00 (432 × 540)	2 755	10.4909/0.0137	9.9803/0.0174	9.2908/0.0163
IPPR-data1 (320 × 240)	300	13.9426/0.0126	13.7264/0.0137	13.5673/0.0142
SampleVideo (360 × 240)	80	12.3920/0.0216	12.1984/0.0193	11.3998/0.0209
平均值	1 045	12.2746/0.0160	11.9684/0.0168	11.4193/0.0171

方法的 SNR 相比于原始灰度图像也相差不多.

根据上述客观评价指标, 本文的时空滤波增强方法在保持较高水平 SNR 的同时, 能够有效地增强图像的对比度和清晰度, 即有效地凸显了具有运动特性的目标.

#### 4 结论

本文提出了一种基于蛙眼视觉特性的不对称各向异性感受野模型, 该方法的主要贡献有: 1) 在静态高斯差分模型的基础上加入时间信息和空间各向

异性信息, 提出一种基于蛙眼视觉特征的“不对称各向异性感受野模型(AARF)”. 2) 结合蛙眼感受野的时空动态性, 进一步提出一种面向图像序列的运动目标视觉分析的蛙眼时空滤波算子(FSTMF). 3) 该方法对于序列图像中的背景模糊以及运动目标凸显有较好的效果. 滤波实验以及与经典方法的对比实验验证了该模型的有效性, 符合蛙眼的背景模糊而前景清晰的视觉特性. 4) 运动目标检测实验结果表明, 本文所提出的 FSTMF 算子对运动目标的检测实现了有效的预处理.

## References

- Zhang Zhen, Chen Zhe, Lv Li, Wang Xin, Xu Li-Zhong. Adaptive background suppression method based on visual receptive field. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, **35**(1): 191–199  
(张振, 陈哲, 吕莉, 王鑫, 徐立中. 基于视觉感受野的自适应背景抑制方法. 仪器仪表学报, 2014, **35**(1): 191–199)
- Lee Y. *A Neural Network Model of Frog Retina: A Discrete Time-Space Approach*. Massachusetts Amherst: University of Massachusetts Amherst, 1986, **10**: 415–426
- Nishio K, Yonezu H, Furukawa Y. Analog integrated circuit for motion detection with simple-shape recognition based on frog vision system. *Optical Review*, 2007, **14**(5): 271–281
- Zhao Liang, Wang Tian-Zhen, Liu Yong-Hong. Research on frog visual behavior and its computer simulation. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2003, **25**(4): 1–5  
(赵亮, 王天珍, 刘永红. 青蛙视觉行为与计算机模拟概述. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2003, **25**(4): 1–5)
- Wang Zhi-Ling, Chen Zong-Hai, Xu Xiao-Xiao, Wu Liang. A fuzzy region understanding tactic for object tracking based on frog's vision characteristic. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(8): 1048–1054  
(王智灵, 陈宗海, 徐萧萧, 吴亮. 基于蛙眼视觉特性的运动目标模糊化区域理解跟踪方法. 自动化学报, 2009, **35**(8): 1048–1054)
- Xiao S S, Gao N. Research on visual invariance based on dynamic receptive field. In: Proceedings of the 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. Wuhan, China: IEEE, 2008, **1**: 273–276
- Zhang P. Extracting visual saliency based on multi-scale receptive field template. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA). Zhangjiajie, China: IEEE, 2011. 527–530
- Ekvall S, Kragic D. Receptive field cooccurrence histograms for object detection. In: Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, Alberta, Canada: IEEE, 2005. 84–89
- Perez C A, Salinas C A, Estevez P A, Valenzuela P M. Genetic design of biologically inspired receptive fields for neural pattern recognition. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2003, **33**(2): 258–270
- Yang B, Zhao Q Y, Zhang R, Yin B L. Receptive field based image modeling method for interactive segmentation. In: Proceedings of the 2nd International Congress on Image and Signal Processing. Tianjin, China: IEEE, 2009. 1–4
- Lee D H, Lee J J. Incremental receptive field weighted actor-critic. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 62–71
- Lettvin J Y, Maturana H R, McCulloch W S, Pitts W H. What the frog's eye tells the frog's brain. *Proceedings of the IRE*, 1959, **47**(11): 1940–1951
- Hoshino N, Matsumoto N. Intracellular analysis of directional sensitivity of tectal neurons of the frog. *Brain Research*, 2003, **966**(2): 185–193
- Li Xiao-Ping, Bian Zhao-Qi, Wang Yun-Jiu. An efficient algorithm for the implementation of a 2D Gabor filtering. *Acta Automatica Sinica*, 1989, **15**(2): 136–141  
(李小平, 边肇祺, 汪云九. 二维 Gabor 滤波器的快速实现. 自动化学报, 1989, **15**(2): 136–141)
- Li Xiao-Lei, Ma Miao. Contour detection based on combination of LoG filters method. *Computer Technology and Development*, 2014, (11): 28–31  
(李晓磊, 马苗. 基于组合 LoG 滤波方法的轮廓检测. 计算机技术与发展, 2014, (11): 28–31)
- Chen Xiao-Hong. Research on Touchscreen Glass Defects Detection Methods Based on Computer Vision [Master dissertation]. South China University of Technology, China, 2013.  
(陈晓红. 基于机器视觉的触摸屏玻璃缺陷检测方法研究 [硕士学位论文], 华南理工大学, 中国, 2013.)
- Zhou Bo, Qian Kun, Ma Xu-Dong, Dai Xian-Zhong. A new nonlinear set membership filter based on guaranteed bounding ellipsoid algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(2): 150–158  
(周波, 钱堃, 马旭东, 戴先中. 一种新的基于保证定界椭球算法的非线性集员滤波器. 自动化学报, 2013, **39**(2): 150–158)

- 18 Zhao Lin, Wang Xiao-Xu, Sun Ming, Ding Ji-Cheng, Yan Chao. Adaptive UKF filtering algorithm based on maximum a posterior estimation and exponential weighting. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(7): 1007–1019

(赵琳, 王小旭, 孙明, 丁继成, 闫超. 基于极大后验估计和指数加权的自适应 UKF 滤波算法. *自动化学报*, 2010, **36**(7): 1007–1019)

- 19 Zhang Gui-Mei, Zhang Song, Chu Jun. A new object detection algorithm using local contour features. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(10): 2346–2355

(张桂梅, 张松, 储珺. 一种新的基于局部轮廓特征的目标检测方法. *自动化学报*, 2014, **40**(10): 2346–2355)

- 20 Chen C Y, Zhao M Y. Video segmentation algorithm based on improved kirsch edge operator and three-frame difference. *Advanced Materials Research*, 2014, **981**: 335–339

- 21 Aгаian S S, Silver B, Panetta K A. Transform coefficient histogram-based image enhancement algorithms using contrast entropy. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(3): 741–758



**李智勇** 湖南大学教授. 主要研究方向为动态多目标优化, 量子进化计算, 图像理解与视觉认知计算. 本文通信作者.

E-mail: zhiyong.li@hnu.edu.cn

(**LI Zhi-Yong** Professor at Hunan University. His research interest covers dynamic multi-objective optimization, quantum-inspired evolutionary computation, image understanding, and visual cognitive computing. Corresponding author of this paper.)

(LI Zhi-Yong Professor at Hunan University. His research interest covers dynamic multi-objective optimization, quantum-inspired evolutionary computation, image understanding, and visual cognitive computing. Corresponding author of this paper.)



**何霜** 湖南大学信息科学与工程学院硕士研究生. 2012 年获得湖南商学院学士学位. 主要研究方向为图像处理, 运动目标跟踪.

E-mail: heshuang@hnu.edu.cn

(**HE Shuang** Master student at the College of Information Science and Engineering, Hunan University. She received her bachelor degree from Hunan University of Commerce in 2012. Her research interest covers image processing and visual object tracking.)

(HE Shuang Master student at the College of Information Science and Engineering, Hunan University. She received her bachelor degree from Hunan University of Commerce in 2012. Her research interest covers image processing and visual object tracking.)



**刘俊敏** 软件工程师. 2013 年获得湖南大学硕士学位. 主要研究方向为图像处理, 运动目标跟踪.

E-mail: girtiantian@126.com

(**LIU Jun-Min** Software engineer. She received her master degree from Hunan University in 2013. Her research interest covers image processing and visual object tracking.)

(LIU Jun-Min Software engineer. She received her master degree from Hunan University in 2013. Her research interest covers image processing and visual object tracking.)



**李仁发** 湖南大学教授. 主要研究方向为嵌入式系统, 信息物理系统, 人工智能与机器视觉.

E-mail: lirenfa@vip.sina.com

(**LI Ren-Fa** Professor at Hunan University. His research interest covers embedded system, cyber-physical systems (CPS), artificial intelligence, and machine vision.)

(LI Ren-Fa Professor at Hunan University. His research interest covers embedded system, cyber-physical systems (CPS), artificial intelligence, and machine vision.)