

文章编号:1007-2780(2017)12-0993-06

基于多模板的深度核相关滤波跟踪

李雪晴, 杨德东*, 毛 宁, 杨福才

(河北工业大学 控制科学与工程学院, 天津 300130)

摘要:针对跟踪过程中出现的遮挡、尺度变化、光照变化等问题,文章基于多模板提出深度核相关滤波算法。首先,多模板算法选取最佳滤波参数优化分类器训练样本的能力,多特征算法利用多种特征优化目标外观模型提高了跟踪过程的鲁棒性;其次,利用深度图信息计算跟踪过程中目标重叠率,判断目标的遮挡情况,遮挡时重新定义目标搜索区域,并判断是否重新跟踪目标,降低遮挡情况下的算法漂移问题;最后,根据目标遮挡情况判断是否更新分类器参数和目标外观模型,提高模板更新的可靠性。利用 Princeton 数据库测试算法,成功率和精度分别达到 85.1 和 98.6,比第二名算法分别提高了 7.04% 和 4.67%。实验从成功率、精确度方面说明基于多模板的深度核相关滤波算法优于传统算法,有一定研究价值。

关键词:目标跟踪;多模板;深度信息;重叠率

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173212.0993

Depth kernel correlation filtering tracking based on multi-template

LI Xue-qing, YANG De-dong*, MAO Ning, YANG Fu-cai

(School of Control Science and Engineering,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Aiming at the problems of occlusion, scale transformation and illumination change in the tracking process, a depth kernel correlation filtering algorithm is proposed based on the multi-template. Firstly, the multi-template algorithm selects the best filtering parameters to optimize the ability of the classifier training samples. The various features are used to optimize the target appearance model which improves the robustness of the multi-feature algorithm. Then, in the tracking process, the depth map information is applied to calculate the target overlap rate which is employed to judge whether the tracking target is occluded. When occlusion occurs, the target search area is redefined, and the target is judge whether to track gain. So it reduces the problem of algorithm drift in the case of occlusion. Finally, according to whether or not occlusion occurs, the classifier parameters and target appearance model are determined whether to update. It improves the reliability of template updates. Using the Princeton database test algorithm, the success rate and accuracy is 85.1% and 98.6% respectively, which is 7.04% and 4.67% higher than the second algorithm respectively. Experiments

收稿日期:2017-08-01; **修订日期:**2017-09-06.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.61203076);河北省自然科学基金项目(No.F2017202009)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.61203076); Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei, China(No.F2017202009)

* 通信联系人, E-mail:lixueq1208@163.com

show that the depth kernel correlation filtering algorithm based on multi-template is superior to the traditional algorithm, and has certain research value.

Key words: target tracking; multi-template; depth information; overlap

1 引言

近年来,目标跟踪技术是一个有挑战性的问题,被广泛应用到人机交互、智能视频监控、无人驾驶智能车等场合。同时,目标跟踪也有很多研究热点难点,如怎样准确快速的解决跟踪过程中出现的目标遮挡、尺度变化、光照变化、旋转运动、相机移动等问题^[1]。

目前,国内外许多学者对跟踪问题的研究提出多种跟踪算法,解决了其中部分问题。目前跟踪算法分为生成式和判别式^[2-4],其中生成式算法运用生成模型描述目标的表现特征,而判别式算法通过训练分类器来区分目标和背景。J F Henriques^[5]等在循环结构的检测跟踪(CSK)基础上提出核相关滤波器算法(KCF),使用梯度直方图(HOG)特征代替原来的灰度特征,将相关滤波器由单通道扩展到多通道,提升了跟踪性能。Y Li^[6]等提出基于特征融合的尺度自适应核相关滤波器(SAMF)算法,融合颜色特征属性和 HOG 属性,应用尺度池解决尺度变化问题。L Bertinetto^[7]等提出 Staple 算法,利用颜色直方图对形变的鲁棒性,梯度直方图对运动模糊和光照变化的鲁棒性,根据相关滤波计算各自的响应,再求最后的响应和目标位置。M Danelljan^[8]等提出精确尺度估计跟踪(DSST)算法,设计独立的位置滤波器和尺度滤波器,进行目标定位和尺度评估,求取目标精确位置。S Song^[9]等基于深度数据构建深度图(RGBD),建立统一的基准数据库,定量比较 RGBD 输入的跟踪算法,有效的处理模型漂移和遮挡问题。G M García^[10]等基于 Condensation 滤波跟踪算法提出特征池提升分类器区分目标和背景的能力,同时将深度测量融合进 3D 预测,提高了跟踪的鲁棒性和精确度。M Camplani^[11]等基于颜色的 RGBD 和 KCF 算法提出深度核相关滤波(DSKCF)算法,利用尺度因子解决尺度变化问题,利用重叠率解决遮挡,提高跟踪精确度。

但是以上算法都不能很好地解决跟踪过程中出现的遮挡、尺度变化问题。本文提出多模板算

法利用迭代运算选择最优分类器,提高了 KCF 算法的分类器训练样本能力;提出多特征算法利用提取的多种特征级联提升了目标外观模型,提高了本文算法的鲁棒性;提出颜色深度图的重叠率解决跟踪中的遮挡问题,提高了跟踪的精确度。针对跟踪中出现遮挡、尺度变化问题,实验数据在成功率和精确度方面说明本文算法的有效性。

2 核相关滤波算法

核相关滤波算法将目标跟踪任务转化为在线分类问题,通过对基准样本循环偏移产生大量样本 $x_i (i \in \{0, \dots, m\} \times \{0, \dots, n\})$,再利用样本训练分类器参数,使损失函数最小:

$$\min_w \sum_i (f(x_i) - y_i)^2 + \lambda \|w\|^2, \quad (1)$$

其中: x_i 表示当前帧样本特征, $f(x_i) = w^T x_i$ 表示目标实际响应, y_i 表示目标期望响应, λ 表示正则化因子, w 表示分类器参数。

通过训练分类器,找到对偶空间的最优分类器参数:

$$\hat{\alpha}^* = \hat{y} / (\hat{k}^{xx} + \lambda), \quad (2)$$

其中: $\hat{k}^{xx} = \langle \varphi(x), \varphi(x) \rangle$, $\varphi(x_i)$ 表示模板 x_i 的目标外观模型, $\hat{\cdot}$ 表示傅里叶变换, $*$ 表示共轭。然后通过相关滤波算法计算目标响应:

$$\hat{f}(z) = \hat{k}^{xz} \odot \hat{\alpha}, \quad (3)$$

其中: $f(z)$ 表示输出响应, $\odot$ 表示点积运算,然后通过寻找最大响应所在位置估计目标位置。

3 本文算法

为了解决目标跟踪中的尺度变化问题和遮挡问题,提高目标跟踪算法的跟踪精度,文章基于多模板提出深度核相关跟踪算法。本文通过利用多模板相关滤波算法解决相关滤波算法中多维滤波模板和非线性核问题,然后利用深度图快速分割算法解决目标尺度问题,使用基于重叠率的方法解决目标遮挡问题和模板更新问题,同时利用多

特征融合构造鲁棒的目标外观模型。

3.1 多模板核相关滤波算法

传统的核相关滤波算法不能解决多维滤波模板和非线性核问题。本文利用文献[12]中的方法解决此问题。这里为简化推导,本文分析二维模板(可以类推到多维模板),即:

$$\min \left\| \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} \omega - \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \right\|_2^2 + \lambda \|\omega\|_2^2, \quad (4)$$

通过引入惩罚因子 $\mu \|\omega_1 - \omega_2\|_2^2/2$, 将问题转换成单模板滤波优化问题, 通过定点优化策略解决单模板滤波问题, 即固定分类器参数 ω_2 迭代更新 ω_1 。在对偶域求解得分类器 1 参数:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= -\varphi_1^\top(x)(\omega_1^\top \varphi_1(x) - y) / \\ &(\lambda + \mu) + K\omega_2^i, \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $K = \mu/(\lambda + \mu)$ 。

再将 ω_1 回代求分类器参数得:

$$\hat{\alpha} = \hat{\psi} / (\hat{k}^{xx} + \lambda + \mu), \quad (6)$$

其中: $\psi = y - (KI + (\lambda K + \mu(K-1))(\phi_1 \phi_1^\top)^{-1}) \hat{\omega}_2^i$ 。再根据 KCF 算法计算目标位置。

3.2 多特征算法

文章考虑到梯度方向直方图特征(HOG)对运动模糊和光照变化的鲁棒性, 颜色命名特征(CN)对旋转变化和目标形变的鲁棒性, 同时利用传统灰度特征(Gray)表示目标外观模型, 级联后的目标特征为: $x = [x_{\text{HOG}}, x_{\text{CN}}, x_{\text{Gray}}]$, 其中, $x_{\text{HOG}}, x_{\text{CN}}, x_{\text{Gray}}$ 分别表示梯度方向直方图特征、颜色命名特征和灰度特征。

3.3 重叠率处理遮挡算法

文章利用深度图快速分割算法^[13-14]解决跟踪中目标尺度变化问题。本文通过计算尺度因子 $s = d_{\text{obj}}^{\text{t0}}/d_{\text{obj}}$ ($d_{\text{obj}}^{\text{t0}}$ 为初始深度), 获得当前目标大小 (w_s, h_s), 再利用线性插值将当前目标大小插值为 (w, h)。

在尺度变化过程中, 定义遮挡情况:

$$\nu = \begin{cases} 1 & (\Phi(O_{\text{obj}}) > \lambda_{\text{occ}}) \wedge (\hat{f}(z)_{\text{max}} \leq \delta_1) \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \quad (7)$$

其中: $\nu=1$ 表示发生遮挡情况, $\nu=0$ 表示没有发生遮挡情况。 $\Phi(O_{\text{obj}})$ 表示分割区域 O_{obj} 中的部分区域, $\lambda_{\text{occ}}=0.35$, $\hat{f}(z)_{\text{max}}$ 表示最大响应, $\delta_1=0.4$, $\wedge$ 表示并操作。

再定义尺度变化过程中目标的重叠率:

$$\text{over} = S_3 / (S_1 + S_2 - S_3), \quad (8)$$

其中: S_1 是跟踪目标的区域面积, S_2 是遮挡物的区域面积, $S_3 = S_1 \cap S_2$ 是跟踪目标与遮挡物重叠部分的面积。

当发生遮挡时, 重新定义当前帧目标搜索区域为:

$$O_{\text{search}}^i = O_{\text{occ}}^{i-1} \vee O_{\text{bc}}^{i-1} \vee O_{\text{occ}}^i, \quad (9)$$

其中: O_{occ}^{i-1} 表示上一帧的遮挡区域, O_{bc}^{i-1} 表示上一帧的最优目标候选区域, O_{occ}^i 表示当前帧的遮挡区域, $\vee$ 表示或操作。

同时, 判断是否重新跟踪目标:

$$\nu = \begin{cases} 1 & (\text{over} < \lambda_{\text{occ}}) \vee (\hat{f}(z)_{\text{max}} \leq \delta_2) \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \quad (10)$$

其中: $\nu=1$ 表示重新计算目标, $\nu=0$ 表示不需要重新计算目标, $\delta_2=0.2$ 。

3.4 模板更新

根据遮挡情况判断是否进行模板更新, 发生遮挡时不进行模板更新, 没有发生遮挡时进行更新分类器参数 α 和目标外观模型 $\varphi(x)$, β 表示学习速率:

$$\begin{cases} \alpha_i = (1 - \nu\beta)\alpha_{i-1} + \nu\beta\alpha_i \\ \varphi(x_i) = (1 - \nu\beta)\varphi(x_{i-1}) + \nu\beta\varphi(x_i) \end{cases}. \quad (11)$$

3.5 本文跟踪算法流程

本文跟踪算法流程

1. 输入: 目标初始位置和目标初始大小。输出: 跟踪目标位置和目标大小。
2. 根据多模板相关滤波算法, 计算分类器参数。
3. 根据公式(8)计算重叠率大小, 利用公式(7)判别目标是否发生遮挡。
4. 若发生遮挡时, 根据公式(9)在新的搜索区域内进行遮挡处理, 利用公式(10)判断是否重新跟踪目标。
5. 若没发生目标遮挡, 根据尺度因子寻找最佳目标尺度, 利用公式(11)目标模板更新。
6. 根据公式(3)计算目标响应, 响应值最大处即目标位置处。
7. 如果未到最后帧, 跳转到步骤 2, 到最后帧则输出跟踪结果。

4 测量实验与结果

利用 Princeton Dataset 中 bear_front、child_nol、face_occ5、new_ex_occ4、zcup_move_1 五个视频序列,验证本文算法的有效性,并与 DSKCF、KCF、CN 算法进行对比。其中,数据集序列包括目标遮挡、尺度变化、快速运动、复杂背景等属性。本文实验平台为 Matlab2012a,电脑配置参数为 Intel i3-2370M CPU,主频 2.4 GHz,内存 4G。本文算法使用 3 个特征通道。正则化

参数为 10^{-4} ,高斯核带宽为 0.1,尺度因子范围为 0.4~2.2。在实验过程中,这些参数固定不变。

4.1 定量分析

本文通过计算成功率和精确度进行性能评估。精确度是跟踪目标框中心位置与真实目标框中心位置的距离低于 20 个像素的帧数占总帧数的百分比,成功率是跟踪目标框与真实目标框的重叠率大于 0.35 的帧数跟踪成功的百分比。

表 1 跟踪算法在 5 个视频序列上的成功率

Tab.1 Success rate of videos with 5 videos for the trackers (%)

	bear_front	child_nol	zcup_move_1	face_occ5	new_ex_occ4	average
OURS	86.1	84.2	88.9	79.8	82.1	85.1
DSKCF	75.7	76.7	81.5	85.5	78.3	79.5
KCF	18.6	66.3	72.5	79.7	46.1	56.6
CN	12.9	98.2	82.2	50.0	54.2	57.5

表 2 跟踪算法在 5 个视频序列上的精确度

Tab.2 Precision of videos with 5 videos for the trackers (%)

	bear_front	child_nol	zcup_move_1	face_occ5	new_ex_occ4	average
OURS	97.4	100.0	100.0	100.0	97.6	98.6
DSKCF	85.3	92.1	100.0	98.6	95.1	94.2
KCF	19.8	96.8	100.0	93.1	56.8	73.3
CN	15.3	100.0	98.6	52.5	51.5	62.1

从表 1 可以看出本文算法的平均成功率为 85.1,分别比 DSKCF 算法的 79.5、KCF 算法的 56.6 和 CN 算法的 57.5 提高了 7.04%、50.35%和 48.00%,同时从表 2 能得到本文算法的平均精确度为 98.6,分别比 DSKCF 算法的 94.2、KCF 算法的 73.3 和 CN 算法的 62.1 提高了 4.67%、34.51%和 58.77%。

视频序列 child_nol、zcup_move_1 具有尺度变化特征,并且没有遮挡情况发生。以 zcup_move_1 序列为例,本文算法的成功率和精确度分别为 88.9、100.0,相比第二名 CN 算法的 82.3、98.6 提高了 8.01%、1.42%。这是因为本文算法计算尺度因子,获得当前目标大小,同时利用

多特征 HOG、CN、Gray,提高了尺度变化时跟踪的可靠性,验证了本文多模板、多特征和尺度变化策略的有效性。

视频序列 bear_front、face_occ5、new_ex_occ4 都具有目标遮挡的属性。以 bear_front 序列为例,成功率和精确度很好的说明了本文算法的优越性。其分别为 86.1、97.4,相对于第二名算法 DSKCF 的 75.7、85.3 分别提高了 13.74%、14.19%。这是因为在尺度变化过程中,本文算法根据重叠率定义是否发生遮挡,当发生遮挡时计算检测目标外观模型,同时判断是否重新跟踪目标,从而提高了跟踪的判断力,验证了本文算法的有效性。

测试本文算法在 5 个视频上的跟踪速度(使用本文指定硬件设备),经计算得本文算法的平均速度为 8.17FPS,基本满足实时性要求。

4.2 定性分析

为了分析算法性能,分别测试本文算法与 DSKCF、KCF、CN 相关滤波算法在不同视频属性上的跟踪结果(图 1 所示)。下面对不同情况下的跟踪效果进行分析与比较:

Bear_front 序列:第 50 帧时,在白色纸盒遮挡目标小熊后,由于本文算法和 DSKCF 算法利用了重叠率和深度信息,能及时目标更新避免发生漂移,解决了目标遮挡问题,所以能成功跟踪目

标小熊。而 KCF 算法和 CN 算法跟踪失败。

Child_no1 序列:第 64 帧时,KCF 利用目标小孩的纹理信息和 HOG 特征成功的跟踪目标,CN 利用颜色特征也成功的跟踪目标。而本文算法和 DSKCF 算法则利用多模板、多特征和尺度变化策略在成功跟踪目标同时也提高了精度。

Face_occ5 序列:第 187 帧中,在书本遮挡目标人脸后,由于本文算法和 DSKCF 算法利用重叠率和深度信息处理了遮挡情况,所以能成功跟踪目标人脸。由于目标背景有强光照射,而 CN 利用颜色特征失败,跟踪发生偏差。KCF 算法则不能处理目标人脸遮挡情况导致跟踪失败。

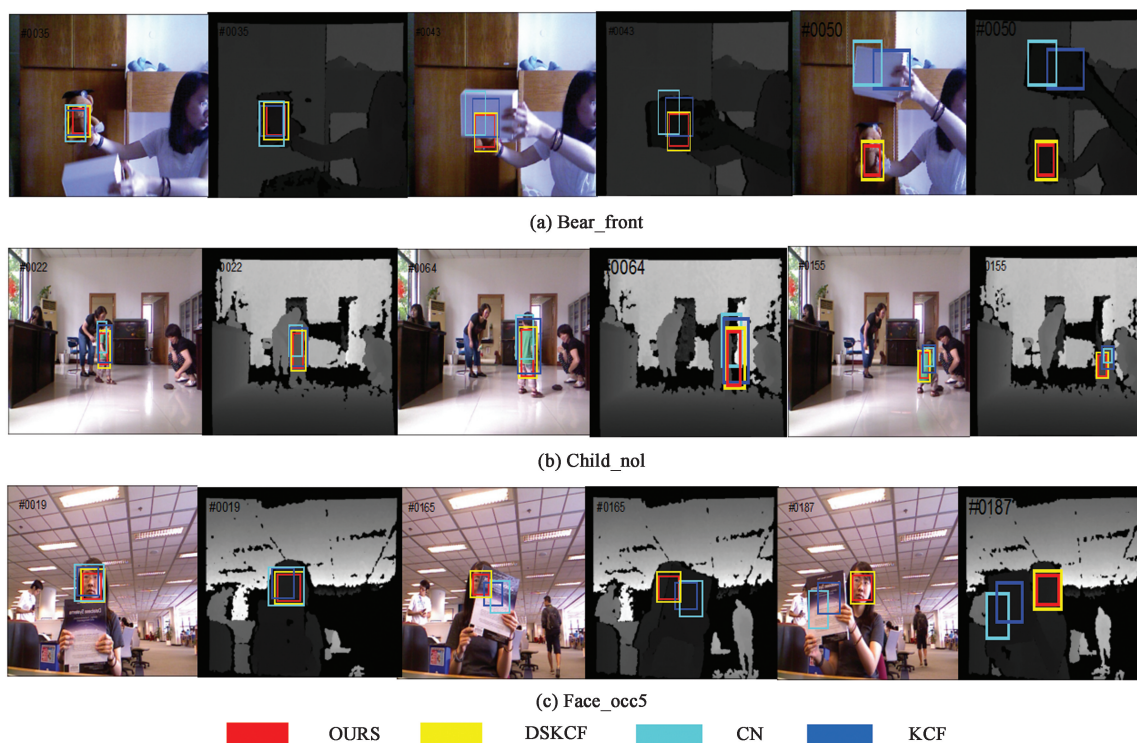


图 1 本文算法与其它 3 种算法的跟踪结果展示(每个序列的第二张图是第一张图对应的深度图)

Fig.1 Tracking results of this paper's algorithm and other three algorithms (The second of each sequence is the first map corresponding to the depth map)

5 结 论

针对跟踪目标出现的遮挡问题,本文提出基于多模板的深度核相关算法。首先提出多模板算法选择最优分类器参数,再用多特征构建目标外观模型,利用尺度因子解决尺度变化问题,利用重叠率处理目标遮挡问题,解决了尺度变化和遮挡时的算法漂移问题,提高了跟踪的准

确性和鲁棒性。文章利用 Princeton 数据库测试本文算法,成功率和精度分别是 85.1 和 98.6,比第二名算法分别提高了 7.04% 和 4.67%,说明本文算法优于传统算法。通过对本算法定性分析和定量分析,发现能解决目标遮挡情况下的跟踪失败问题,并能稳定、准确的跟踪目标,有一定研究价值。但针对跟踪过程出现光照变化、背景嘈杂等情况没有深入分析,是下一步要研究解决的问题。

参 考 文 献:

- [1] 张雷,王延杰,孙宏海,等.采用核相关滤波器的自适应尺度目标跟踪[J].光学 精密工程,2016,24(2):448-459.
ZHANG L, WANG Y J, SUN H H, *et al.* Adaptive scale object tracking with kernelized correlation filters [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 448-459. (in Chinese)
- [2] COMANICIU D, RAMESH V, MEER P. Kernel-based object tracking [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(5): 564-577.
- [3] KWON J, LEE K M. Visual tracking decomposition [C]//*Proceedings of 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Francisco, CA: IEEE, 2010: 1269-1276.
- [4] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Tracking-learning-detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(7): 1409-1422.
- [5] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, *et al.* High-speed tracking with kernelized correlation filters [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(3): 583-596.
- [6] LI Y, ZHU J. A scale adaptive kernel correlation filter tracker with feature integration [M]//AGAPITO L, BRONSTEIN M, ROTHER C. *European Conference on Computer Vision*. Cham: Springer, 2014: 254-265.
- [7] BERTINETTO L, VALMADRE J, GOLODETZ S, *et al.* Staple: complementary learners for real-time tracking [C]//*Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Las Vegas, NV: IEEE, 2016: 1401-1409.
- [8] DANELLJAN M, HÄGER G, KHAN F S, *et al.* Discriminative scale space tracking [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(8): 1561-1575.
- [9] CAMPLANI M, HANNUNA S, MIRMEHDI M, *et al.* Real-time RGB-D tracking with depth scaling kernelised correlation filters and occlusion handling [C]//XIE X H, JONES M W, TAM G K L. *Proceedings of 2015 British Machine Vision Conference*. Swansea, UK: BMVA, 2015: 145.1-145.11.
- [10] SONG S R, XIAO J X. Tracking revisited using RGBD camera: unified benchmark and baselines [C]//*Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Computer Vision*. Sydney, NSW: IEEE, 2013: 233-240.
- [11] GARCÍA G M, KLEIN D A, STÜCKLER J, *et al.* Adaptive multi-cue 3D tracking of arbitrary objects [C]//PINZ A, POCK T, BISCHOF H, *et al.* *Joint DAGM (German Association for Pattern Recognition) and OAGM Symposium*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, 7476: 357-366.
- [12] BIBI A, GHANEM B. Multi-template scale-adaptive kernelized correlation filters [C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision Workshop*. Santiago: IEEE, 2015: 613-620.
- [13] 张健,李宏升.基于图论阈值算法的图像分割研究[J].液晶与显示,2014,29(4):592-597.
ZHANG J, LI H S. Image mosaic research based on wavelet and rough set algorithm [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(4): 592-597. (in Chinese)
- [14] 陈恺,陈芳,戴敏,等.基于萤火虫算法的二维熵多阈值快速图像分割[J].光学 精密工程,2014,22(2):517-523.
CHEN K, CHEN F, DAI M, *et al.* Fast image segmentation with multilevel threshold of two-dimensional entropy based on firefly algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 517-523. (in Chinese)

作者简介:李雪晴(1994—),女,安徽铜陵人,硕士研究生,2016 年于天津农学院获得学士学位,主要从事图形处理、目标跟踪方面的研究。E-mail:lixueq1208@163.com

杨德东(1977—),男,辽宁阜新人,副教授,硕士生导师,2000 年于大连铁道学院获得学士学位,2003 年于大连铁道学院获得硕士学位,2007 年于东北大学获得博士学位,现为北京航空航天大学博士后,主要从事智能感知与控制、目标跟踪方面的研究。E-mail:ydd12677@163.com