

多模序列图像目标跟踪的特征融合粒子滤波实现

史德琴^{1,2}, 李俊山¹, 耿志¹, 席涛³, 刘军霞⁴, 汪云飞²

(1. 第二炮兵工程学院403教研室,陕西 西安 710025;2. 空军工程大学工程学院,陕西 西安 710038;3. 西安卫星测控中心,陕西 西安 710043;4. 河南省军区自动化站,河南 郑州 450000)

摘要 针对图像制导中信息的模糊性和不确定性问题,将多源信息融合技术应用于红外/可见光双模复合成像制导。采用方差比测量的方法将特征选择问题转化为一个两类判别问题,并引入自适应特征选择机制;通过计算目标和背景间不同特征分布直方图对应的似然比,在高维特征空间中选择4个判别性较好的特征区分目标和背景,根据 bahattacharyya 距离建立跟踪所需的观测似然函数,在粒子滤波的框架下实现了算法对单模序列图像中目标的跟踪;引入跟踪性能品质度量因子和加权融合策略衡量多信源下对目标的跟踪性能,实现对双模序列图像中目标的稳健跟踪,解决了单一信源在特定因素下跟踪性能不理想的缺陷,提高了算法性能。仿真实验结果验证了算法的有效性。

关键词 目标跟踪;粒子滤波器;信息融合;增广方差比;图像序列;品质度量因子

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.05.013

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)05-0061-06

科学技术的飞速发展使现代战争中攻防对抗日益激烈,精确制导武器攻击时遇到的对抗层次越来越多,对抗手段越来越高明;加上目标的隐身、低空、超低空高速突防及多方位、饱和攻击战术的使用,使当前采用单一制导方式的精确制导武器难以完成作战使命,因而,发展多模复合制导方式已迫在眉睫;同时,发展智能化多模复合导引头业已成为各军事强国争夺的制高点。

随着红外探测技术和红外信息处理技术的飞跃发展,红外成像传感器因具有全天候、穿透力强、作用距离远等诸多优点,现已被广泛应用于精确制导武器的(寻的)导引头,并成为多数复合导引头的基础。而可见光图像能给出目标丰富的颜色、纹理、轮廓等特征,在近距离对目标跟踪、识别时具有明显的优势,因此,将可见光与红外成像传感器进行集成,从而构成可见光/红外双模复合导引头是提高精确制导武器性能的一个重要方向^[1-5]。但是,基于多模复合导引头的多源信息融合技术,依然是制约导引头性能的关键因素。

近年来,人们将粒子滤波技术应用于序列图像目标跟踪开展了大量的研究工作^[6-8],并验证了该项技术在视觉跟踪中的有效性。本文针对可见光/红外双模复合成像制导中目标融合跟踪技术展开研究,基于多特征融合的粒子滤波算法,首先分别在可见光、红外序列中,根据状态层次采样方法,实现目标多视觉特征融合跟踪,然后按照自适应加权平均思想,实现多信源目标融合稳健跟踪。

1 粒子滤波算法

近年来,为了更好地处理视觉跟踪中的非线性、非高斯的动态系统状态估计问题,人们将粒子滤波(Particle Filter)算法应用到计算机视觉领域。它以 Monte Carlo 随机模拟理论为基础,用一组加权随机采样 $\{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^N$ 表示系统状态后验概率分布 $p(X_k | z_{1:k})$ 。

* 收稿日期:2011-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61075025)

作者简介:史德琴(1970-),女,河北涿鹿人,博士生,主要从事图像处理、视觉目标跟踪研究。

E-mail:shideqin33@163.com

假定目标状态演化是马尔科夫过程 $p(X_k | X_{k-1})$ 且观测值 $\{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ 相互独立, 给定状态转移先验概率 $p(X_k | X_{k-1})$ 和观测似然函数 $p(Z_k | X_k)$, 根据贝叶斯理论可以求得后验概率分布:

$$p(X_k | Z_{1:k}) = \frac{p(Z_k | X_k) \int p(X_k | X_{k-1}) p(X_{k-1} | Z_{1:k-1}) dX_{k-1}}{\int p(Z_k | X_k) \int p(X_k | X_{k-1}) p(X_{k-1} | Z_{1:k-1}) dX_{k-1} dX_k} \quad (1)$$

通常式(1)表示的状态后验概率很难得到其解析解, 所以人们提出采用提议分布 $q(X_k | X_{k-1}, z_{1:k})$ 近似后验分布, 从中采样得到一组粒子(样本), 并通过加权的形式逼近状态后验概率分布。粒子重要性权值迭代更新如下:

$$w_k^i = w_{k-1}^i \frac{p(Z_k | X_k^i) p(X_k^i | X_{k-1}^i)}{q(X_k^i | X_{k-1}^i, z_{1:k})} \quad (2)$$

后验分布 $p(X_k | z_{1:k})$ 表示为^[7]:

$$p(X_k | Z_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^N w_k^i \delta(X_k - X_k^i) \quad (3)$$

2 粒子滤波框架下的可见光/红外序列图像目标融合跟踪

在可见光/红外双模复合制导中, 对目标的准确稳健跟踪是智能信息处理的一个关键环节。文中以共径可见光/红外摄像头同步拍摄的空天背景序列图像目标跟踪为例, 在粒子滤波理论框架下, 研究基于自适应多特征融合的多源序列图像目标跟踪问题。

2.1 系统状态描述

为研究多源、多特征目标跟踪方便起见, 取目标状态 $\mathbf{X} = \{x, \mathbf{x}, y, \mathbf{y}\}$, 其中, x, y 表示目标在图像平面中的位置; \mathbf{x}, \mathbf{y} 分别表示目标在图像平面 2 个方向上的运动速度。在粒子滤波理论框架下, 定义可见光、红外序列中目标运动状态方程如下:

$$X_k - X_{k-1} = X_{k-1} - X_{k-2} + U_k \quad (4)$$

式中 U_k 为均值为零、协方差阵为对角矩阵的系统噪声。

2.2 特征选择及目标描述

按照可见光、红外图像序列中目标特性, 选择可见光图像中的 RGB、HSV、rgb 颜色空间描述运动目标, 并以 $M_1 = \{R, G, B, H, S, V, r, g, b\}$ 构建目标视觉特征空间; 在红外图像序列中, 以目标 3 个方向上的 Gabor 滤波响应构建目标特征空间 $M_2 = \{G_{\theta_1}, G_{\theta_2}, G_{\theta_3}\}$, 以下简称为 $M_2 = \{G1, G2, G3\}$ 。其中 Gabor 函数具有如下形式:

$$G(x, y, \theta, f) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{x'^2}{\sigma_x^2} + \frac{y'^2}{\sigma_y^2}\right]\right] \cos(2\pi f x'), \text{ 其中, } \begin{cases} x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = y \cos \theta - x \sin \theta \end{cases}, \text{ 设 } f = 25 \text{ Hz}, \sigma_x^2 = 2, \sigma_y^2 = 4$$

pixels, 3 个方向 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/4, \theta_3 = \pi/2$ rad。

在目标跟踪开始之前, 先手动分别在可见光、红外序列的第 1 帧中选择被跟踪的目标, 作为参考目标模板, 然后分别计算各个特征的概率密度函数(直方图), 作为目标参考模型。图 1、图 2 分别给出了可见光、红外目标模板及相应的参考直方图。

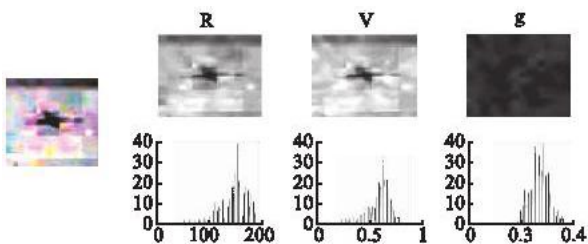


图 1 可见光中目标模板及参考直方图

Fig. 1 The reference template and histogram of target in visible image respectively

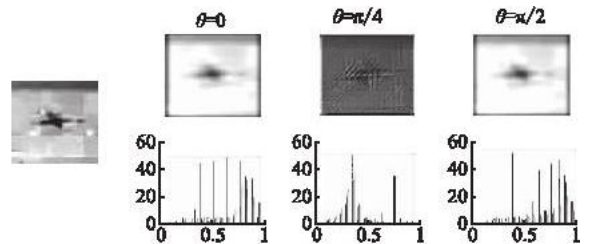


图 2 红外图像中目标模板及参考直方图

Fig. 2 The reference template and histogram of target in infrared image respectively

2.3 自适应特征选择

视觉跟踪中,多特征(多源图像)之间的互补性,能有效改善单一特征对目标描述的不确定性,但是由于目标所处背景的复杂性、时变性以及跟踪过程中,目标自身受到光照、遮挡等因素的影响,采用多个固定的视觉特征对跟踪性能的改善非常有限,同时也会增加计算的复杂度。为了克服以往采用多个固定特征描述目标的不足,引入在线自适应特征选择机制,从高维特征空间中,选择若干个能较好区分目标与其背景的视觉特征,然后,基于此构建粒子滤波算法所需的观测似然函数。

论文采用2类方差比测量,选择具有较好判别性的视觉特征。于是,该特征选择问题便转化成2类(背景/目标)判别分析问题。图3给出了可见光序列图像中,目标所处背景区域与目标区域示意图,图中黑色小矩形框表示目标类(其中像素标注为正样本),黑色矩形框外,绿色矩形框内的区域表示背景类(其中像素标注为负样本)。

给定特征 $F \in \{R, G, B, H, S, V, r, g, b, G1, G2, G3\}$, 分别建立目标和背景的特征分布直方图 $p(i)$ 和 $q(i)$, 并设定 $\text{bins} = 32$, 然后按式(6)计算该特征下,背景分布与目标分布的对数似然比。

$$L(i) = \log \frac{\max\{p(i), \delta\}}{\max\{q(i), \delta\}} \quad (6)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, \text{bins}$; δ 为小量,为防止除数为零,一般取 $\delta = 0.001$ 。将该对数似然值反向映射到图像空间形成似然图像,若给定特征判别性较好,则似然图像中,目标与背景呈现出明显的区别;反之目标与背景之间对比不显著。最后,根据似然图像中背景与目标的对数似然比分布,按式(7)给出的增广方差比(AVR)^[9],解算各个特征 $\{R, G, B, H, S, V, r, g, b, G1, G2, G3\}$ 的判别得分(得分越高判别性越好,反之则较差)。

$$\text{AVR}(L; p, q) \equiv \frac{2|\mu_p - \mu_q| \text{var}(L; (p+q))}{[\text{var}(L; p) + \text{var}(L; q)]} \quad (7)$$

2.4 层次采样粒子滤波算法目标跟踪

为了提高算法的执行效率,按上述判别得分情况,选择4个判别性较好的特征(假设特征之间相互独立);然后,在对应的特征下,根据参考直方图与候选区域直方图(粒子状态标识的目标区域),按 Bhattacharyya 距离建立观测似然函数。

$$p(Z|X) \propto \exp\left(-\frac{d^2(\hat{p}_i(X), \hat{q}_i)}{2\sigma_i^2}\right) \quad (8)$$

式中: i 为选择的目标特征描述; $\hat{p}_i(X)$, \hat{q}_i 分别为当前帧中目标 i 特征描述直方图和参考图像中目标 i 特征描述直方图。

从而,在粒子滤波理论框架下,根据式(4)和式(8),可分别在可见光、红外序列图像中实现运动目标跟踪。

2.5 可见光/红外序列目标融合跟踪实现

前面在可见光、红外序列图像中,分别给出了目标跟踪结果。但是由于噪声干扰,背景变化及目标姿态变化等诸多不确定因素的影响,使得单一信源下的跟踪性能不尽人意。因此,为了定量反映2种信源下,目标的跟踪性能,分别在可见光、红外图像序列目标跟踪中定义跟踪性能品质度量因子:

$$q^{\text{index}} \propto \exp\left(-\frac{\text{SSD}}{\sigma_{\text{index}}^2}\right), \text{index} = TV, IR \quad (9)$$

式中: SSD 表示目标状态估计对应的图像区域与参考目标区域之间灰度(强度)的距离; TV 为可见光目标序列; IR 为红外图像序列。对于可见光图像,式(9)目标区域与模板区域之间的 SSD 距离,按照 HSV 色彩空间中 V 分量的强度值计算且 $\sigma_{TV}^2 = 25$; 在红外图像中,按照强度值计算 SSD 距离且 $\sigma_{IR}^2 = 9$ 。

因此,在可见光/红外双模成像制导中,若将第 k 帧,2种信源的跟踪结果分别表示为 \hat{X}_k^{TV} , \hat{X}_k^{IR} , 那么,双模序列图像目标融合跟踪结果可由式(10)求解,即:

$$\hat{X}_k^F = w_k^{TV} \hat{X}_k^{TV} + w_k^{IR} \hat{X}_k^{IR} \quad (10)$$

式中: $w_k^{\text{Index}} = \frac{w_k^{\text{Index}}}{\sum_{\text{Index} \in \{TV, IR\}} w_k^{\text{Index}}} \propto \frac{1}{q^{\text{Index}}}$; w_0^{TV} , w_0^{IR} 是归一化权值,且 $w_0^{TV} = w_0^{IR} = 0.5$ 。

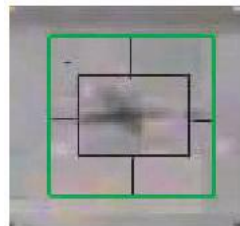


图3 背景/目标示意图

Fig.3 Background/object image

3 多源信息融合跟踪实验及结果分析

在 PC 机 (Dual CPU E2220 2.4 GHz) 上,借助于 MATLAB2009b 软件及相应的 Mex 技术,对空天背景条件下,可见光、红外成像传感器同步拍摄的、分辨率均为 320×240 的视频序列 (共计 120 帧) 进行实验。取粒子数 $N=100$, 初始状态 $X_0 = [220, 2, 145, 2]$, 系统噪声协方差 $Q = \text{diag}(25^2, 2^2, 45^2, 2^2)$ 。分别取可见光、红外序列图像目标特征 $M_1 \cup M_2$ 构成特征空间。首先在可见光、红外序列图像中确定目标的位置, 然后通过自适应加权平均获得多源序列图像目标融合跟踪结果。图 4 给出了基于该算法的跟踪结果。图 4 中第 1, 3 行从左至右, 分别为 #10, #50, #105 中可见光和红外跟踪结果, 第 2 行是融合跟踪结果。图 5、图 6 为跟踪过程中可见光、红外序列跟踪性能的品质度量和融合权值调整曲线。图 7 给出了序列图像跟踪过程中, 根据 2 类增广方差比选择的特征排序及相应的特征似然图像。图 6 中帧 #10, #50, #105 的特征排序从上到下, 从左至右得分递减。

实验结果表明在整个跟踪过程中, 大多数情况下 (#45 - #63 除外), 红外跟踪性能明显优于可见光图像跟踪性能, 见图 5、图 6。如图 4 所示, 融合跟踪结果相比单一信源的跟踪, 效果有了明显地改善 (如 #50, #105)。通过自适应加权融合, 跟踪性能较好的结果对融合的贡献较大, 相应的权值较大。

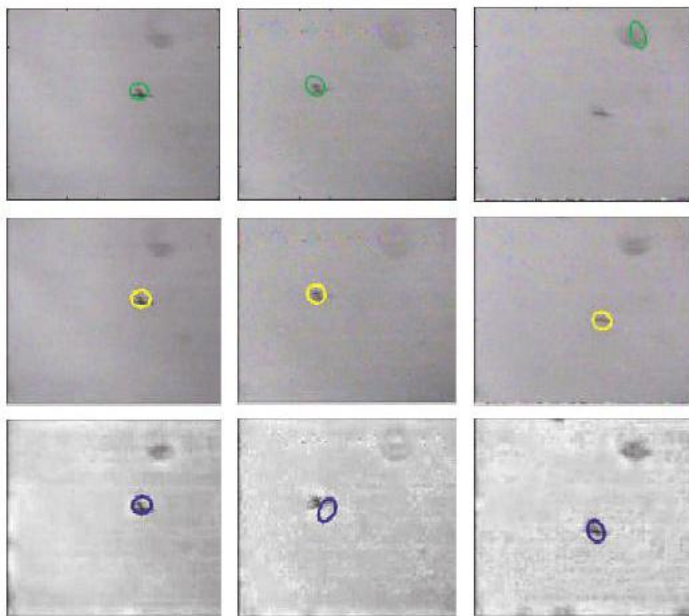


图 4 可见光/红外序列目标跟踪结果

Fig. 4 The tracking results in visible and infrared image sequences

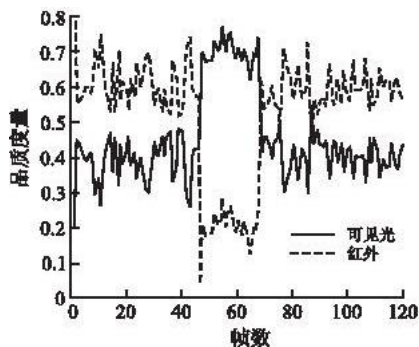


图 5 可见光/红外跟踪品质度量

Fig. 5 The tracking performance in visible and infrared image sequences

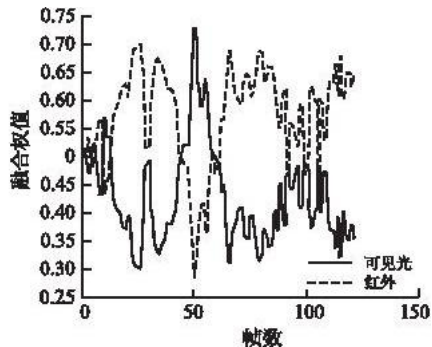


图 6 可见光/红外融合权值

Fig. 6 The fusion weights in visible and infrared image sequences

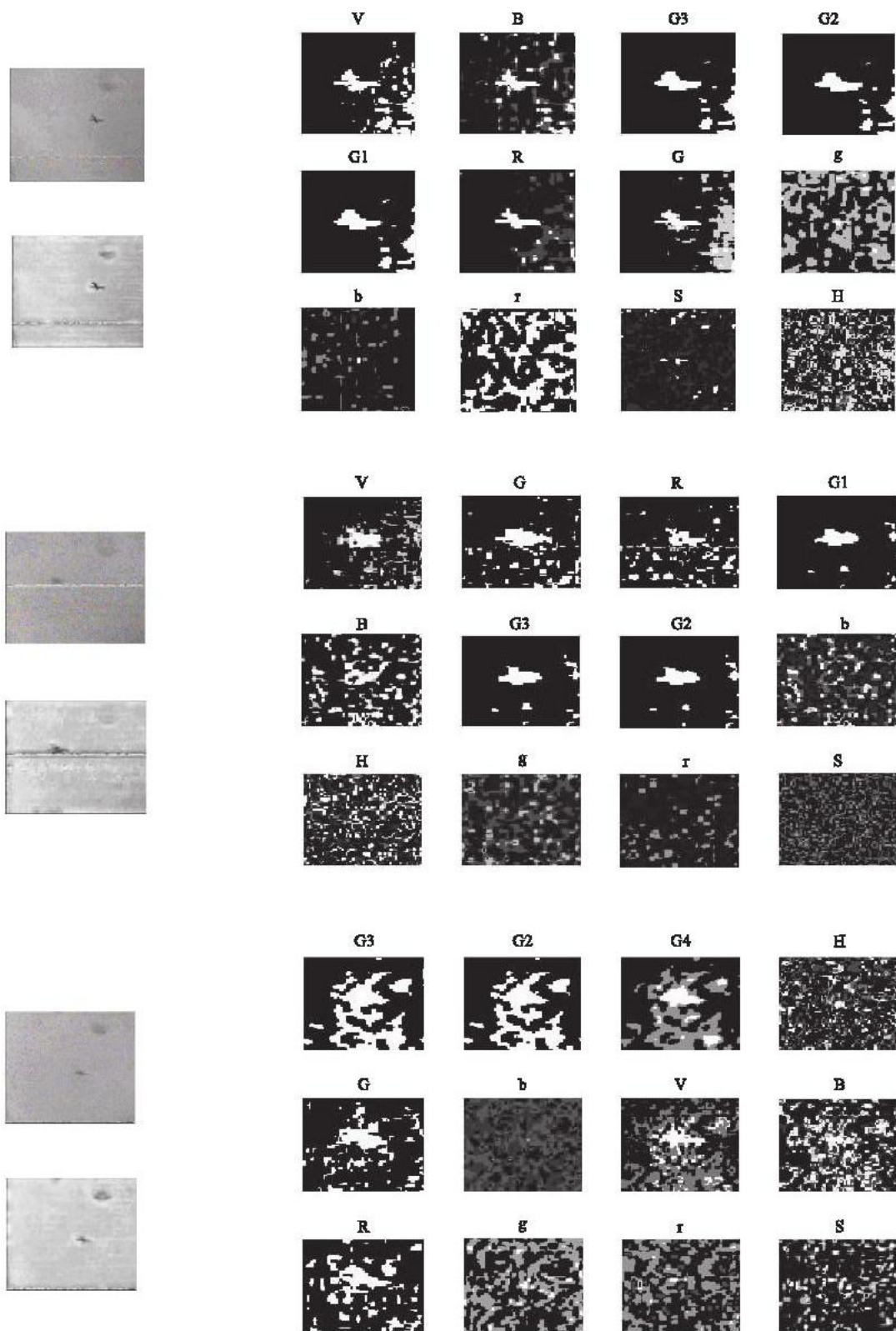


图 7 序列图像中帧#10, #50, #105 的特征排序及对应特征下目标/背景似然图像

Fig. 7 The feature sort and theirs foreground/background likelihood image of frames #10, #50, #105 in visible and infrared sequences

4 结束语

将红外/可见光图像融合跟踪技术应用于序列图像目标跟踪中,在粒子滤波框架下,通过在线自适应特征选择和多源特征融合技术,能够实现序列图像的运动目标的稳健、高效可靠跟踪。

参考文献:

- [1] 刘隆和. 多模复合寻的制导技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
LIU Longhe, Multi-mode composite homing technology[M]. Beijing: National defence industry press, 1998. (in Chinese)
- [2] 夏思宇. 精确制导技术及其现状与发展[J]. 航空科学技术, 2003, 15(1): 43-45.
XIA Siyu. Precision guidance technique and its status and development[J]. Aeronautical science and technology, 2003, 15(1): 43-45. (in Chinese)
- [3] Bruno M G S. Sequential importance sampling filtering for target tracking in image sequences[J]. IEEE signal processing letters, 2003, 10(8): 246-249.
- [4] Xi Tao, Yuan Kui, Zhang Shengxiu. A novel visual tracking algorithm based on multi-cues fusion and particle filter[C]//Proceedings of international conference on computer and industry engineering. Beijing: [s. n.], 2008: 987-992.
- [5] 杨满忠, 尹健, 于雷. 电视导引头作用距离研究[J]. 光电与控制, 2003, 10(2): 27-30.
YANG Manzhong, YIN Jian, YU Lei. Research on operation distance of TV homer[J]. Electronics optics & control, 2003, 10(2): 27-30. (in Chinese)
- [6] Spengler M, Schiele B. Towards robust multi-cue integration for visual tracking[J]. Machine vision and applications, 2003, 14(1): 50-58.
- [7] 席涛, 张胜修, 原魁. 基于遗传进化策略的粒子滤波视频目标跟踪[J]. 光电工程, 2009, 36(3): 28-32.
XI Tao, ZHANG Shengxiu, YUAN Kui. Video object tracking based on particle filter with genetic evolution strategy[J]. Opto-electronic engineering, 2009, 36(3): 28-32. (in Chinese)
- [8] 孙伟. 基于粒子滤波的视频目标跟踪关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
SUN Wei. Research on the theory of visual object tracking and its application based on particle filter[D]. Xi'an: Xidian university, 2008. (in Chinese)
- [9] Nedovic V, Liem M, Corzilius M, et al. Kernel-based object tracking using adaptive feature selection[R]. Project report, 2006: 5-6.

(编辑: 徐楠楠)

Object Tracking Based on Particle Filter with Feature Fusion in Multi-mode Image Sequences

SHI De-qin^{1,2}, LI Jun-shan¹, GENG Zhi¹, XI Tao³, LIU Jun-xia⁴, WANG Yun-fei²

(1. The 403 Staff Room of the Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China; 2. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 3. Satellite Control Center, Xi'an 710043, China; 4. The Automated Workstation of Military Region, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To address the ambiguity of information and uncertainty in the image-guided application, a Multi-source information fusion technology is proposed for infrared/visible dual-mode compound imaging guidance. With augmented variance ratio of two classes, an on-line adaptive feature selection scheme is applied to selecting the distinguished attributions in the infrared and visible images. The results of object tracking are yielded in infrared/visible images respectively based on a particle filter algorithm; by introducing the quality metrics factor of tracking in single-mode image sequences, a weighted fusion strategy is employed to achieve the robust tracking in image sequences, the experimental simulation results has verified the effectiveness of the scheme.

Key words: object tracking; particle filter; information fusion; augmented variance ratio; image sequences; quality metrics factor