

基于区域协方差矩阵的末制导目标跟踪

李少军¹, 李立仁², 刘忠领¹, 朱振福¹

(1. 目标与环境光学特征国防科技重点实验室, 北京 100854; 2. 辽宁省边防局, 辽宁 沈阳 110034)

摘要:针对红外成像末制导阶段目标尺寸和姿态迅速变化的问题,提出了一种基于目标区域协方差矩阵的粒子滤波器目标跟踪方法。为了在红外成像末制导阶段精确跟踪目标以及抑制逐渐显现的图像细节,本方法以目标位置和大小作为目标状态,通过粒子滤波器跟踪在实时帧图像中的目标,并在图像金字塔上迭代定位目标以提高跟踪精度。为了适应目标大小的变化,通过实时更新目标模板(区域协方差矩阵)以调整跟踪窗的大小。选择多种目标特征构造区域协方差矩阵,作为目标描述符来匹配、定位目标。仿真结果表明,该方法不仅能适应末制导阶段目标尺寸的急剧变化,而且对红外成像末制导阶段目标能实现精确跟踪,表现了很好的鲁棒性。

关键词:红外成像末制导;目标区域协方差矩阵;粒子滤波器;目标模板更新

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

Terminal guidance target tracking based on region covariance matrix

LI Shao-jun¹, LI Li-ren², LIU Zhong-ling¹, ZHU Zhen-fu¹

(1. Key Lab of Optical Features of Targets and Environment, Beijing 100854, China;

2. The Border Control Department of Liaoning Province, Shenyang 110034, China)

Abstract: For the problem of rapid change in the size and pose of a target during infrared imaging terminal guidance, the region covariance matrix based particle filter is proposed to precisely track a target in this paper. In order to suppress image details and precisely track a target in the infrared imaging terminal guidance, the position and size of a target are served as the target state which is recursively estimated by the particle filter in the real-time frames, and the tracking precision is improved by the iterative location of a target in the image pyramid. For adapting the variable size of a target, the proposed approach can adjust the size of tracking window by timely update the target template (region covariance matrix). The region covariance matrix as the target feature descriptor consists of multiple image features of a target to locate the frame-to-frame target by feature matching. Experimental results demonstrate that the approach can adapt rapid change in the size of target and precisely track target during infrared imaging terminal guidance, and has the good robustness.

Key words: infrared imaging terminal guidance; region covariance matrix; particle filters; target template update

1 引言

红外成像末制导目标跟踪是红外成像导引头的关键技术之一。在红外成像导引头捕捉到(即识别出)真实目标之后,导引头则进入目标精确跟踪状态。在初始跟踪阶段,弹体距离目标较远,连续帧间

目标的尺度和旋转变化的都很小,随着目标与导引头的距离逐渐缩小,目标成像尺寸迅速变大,跟踪窗必

作者简介:李少军(1977-),男,博士,主要研究方向为自动目标识别,图像末制导。E-mail:robbieshaojun@yahoo.com.cn

收稿日期:2009-11-02;修订日期:2009-11-13

须随着目标的成像尺寸变化自适应变化以保证跟踪窗口始终套住被跟踪目标,实现目标的稳定跟踪。另一方面,新的目标细节信息在跟踪过程中逐渐显现,这极大增加了对目标鲁棒跟踪的困难。

目前,图像跟踪的基本方法由两个部分组成:描述目标特征和通过特征匹配在实时帧图像中定位目标。灰度相关算法^[1]选择目标灰度作为特征,通过相关匹配定位目标,但是目标尺寸快速变化以及目标细节增加对其影响很大,不适宜红外成像末制导的目标跟踪。均值漂移(Mean-Shift)算法^[2]选择目标灰度空间分布作为特征,基于均值迭代跟踪目标,然而目标灰度快速变化影响灰度分布准确表示目标,从而导致目标定位不准。基于特征点的目标跟踪算法^[3-4]利用目标区域中心表示目标,适用于跟踪图像区域较小的目标,不适用于对红外末制导中变化较大的目标跟踪。基于目标表观概率模型的目标跟踪算法^[5-6]高度依赖于表观模型的准确性,也不适用于红外末制导中表观变化很大的目标跟踪。

2 区域协方差矩阵

区域协方差矩阵^[7]描述图像中的目标区域,具有如下优点:①足以匹配不同视角和姿态的目标区域;②协方差矩阵能够很好地融合目标多特征,噪声对特征表示的不利影响在其计算过程中极大被滤波;③不包含特征点数量和顺序信息,具有旋转、尺度不变性以及亮度变化都有很强的适应性。区域协方差矩阵作为目标的特征描述符,是设计跟踪与识别算法最需要的特征。

在红外图像 I 中目标大小为 $h \times w$, $V_i (i = 1, \dots, n)$ 表示目标区域内特征点的特征向量,目标区域的协方差矩阵由区域内的所有特征向量定义:

$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \mu)(V_i - \mu)^T \quad (1)$$

其中, $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$ 是目标区域内特征点的均值,当每个像素都是一个特征点时, $n = h \times w$ 。

特征向量 V_i 中的元素可以是像素的空间位置信息、亮度、颜色、梯度等,还可以是该像素对各种滤波器的响应值。特征向量的选择可以根据实际应用的需要来确定。在红外图像中,典型的特征向量如下:

$$V_i = (x, y, I(x, y), I_x(x, y), I_y(x, y), \dots) \quad (2)$$

其中, (x, y) 表示特征点位置; $I(x, y)$ 表示特征点灰度值; $I_x(x, y)$ 和 $I_y(x, y)$ 是特征点的垂直、水平方向梯度。

协方差矩阵 C 是一个 $d \times d$ 的实对称正定矩

阵,对角线上的值是每个特征量的方差,非对角线上的值是特征之间的相关性。 C 的大小取决于特征向量的维数 $d \times d$,而与目标区域的大小 $h \times w$ 无关。协方差矩阵去均值化,使得它对目标区域的亮度均值变化具有不变性。对特征向量中的像素空间位置信息进行修正,协方差矩阵对目标区域的描述同样具有旋转不变性和尺度不变性。

协方差矩阵的距离测度定义如下:

$$\rho(C_1, C_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^k \ln^2 \lambda_i(C_1, C_2)} \quad (3)$$

其中, $\lambda_i(C_1, C_2)$ 是 C_1, C_2 的通用特征值,如下计算:

$$\lambda_i C_1 X_i - C_2 X_i = 0, i = 1, \dots, d \quad (4)$$

数值计算通用特征值及其特征向量的计算复杂度为 $O(d^3)$,而计算距离测度的计算复杂度为 $O(d^3 + d)$ 。与计算两个 d 维向量的直方图的距离相比,计算协方差矩阵的距离要快得多。

$\rho(C_1, C_2)$ 的定义满足下面 3 条性质^[7-8]:

- 非负性 $\rho(C_1, C_2) \geq 0$, 当且仅当 $C_1 = C_2$ 时等号成立

- 对称性 $\rho(C_1, C_2) = \rho(C_2, C_1)$

- 三角不等式

$$\rho(C_1, C_2) + \rho(C_1, C_3) \geq \rho(C_2, C_3) \quad (5)$$

根据上面的性质可知,若两个目标区域特征越相似,则其区域协方差矩阵的距离越小,反之越大。

3 特征选择

在跟踪过程中,随着目标与导引头的距离逐渐缩小,目标成像尺寸迅速变大,跟踪窗的大小必须自适应变化以保证跟踪窗口始终套住被跟踪目标,这要求区域方差矩阵对目标区域的描述具有旋转和尺度不变性。为此,选择目标点图像坐标 (x, y) ,该像素的灰度值 $I(x, y)$ 和高斯型拉普拉斯算子响应 $I_{\log}(x, y)$ 等特征形成每个像素的特征向量。

- 初始阶段:

$$V = [x - x_0, y - y_0, I(x, y), I_{\log}(x, y)] \quad (6)$$

- 中间阶段:

$$V = \left[\frac{x - x_0}{h}, \frac{y - y_0}{w}, I(x, y), I_{\log}(x, y) \right] \quad (7)$$

4 基于协方差矩阵的目标跟踪

在红外末成像末制导目标跟踪中,状态转移模型刻画了红外目标在帧间的运动特性。对于红外成像跟踪来说,常用的目标运动模型是一阶随机游走模型:

$$X_k = X_{k-1} + e_{k-1} \quad (8)$$

其中, X_k 表示目标状态, $X_k = (x_k, y_k, h_k, w_k)$; e_k 表示零均值、方差为 Q_e 的随机量。

测量模型利用观测数据对目标状态预测进行验证,实际上是相似性度量的过程。利用目标区域的协方差矩阵的距离测度度量在预测状态下的目标特征与参考特征的相似性,参考特征是在跟踪开始时从目标信息文件中抽取的区域协方差矩阵。观测概率模型定义为:

$$p(Z_k | X_k) \propto \exp\left(-\frac{\alpha p(C_1, C_2)}{2}\right) \quad (9)$$

其中, α 是控制参数。

基于区域协方差矩阵的目标跟踪算法描述:

(1) 跟踪初始化: 建立目标参考模板 C_r (协方差矩阵); 前一帧中的目标中心位置作为跟踪算法的初始值 (x_1, y_1) ;

(2) 迭代跟踪:

a) 根据状态方程式(8)产生备选目标区域 X_k^i , $i = 1, \dots, N$;

b) 利用式(1)计算备选目标区域 X_k^i 的协方差矩阵 C_k^i 。在初始阶段, 按照式(6)计算其特征向量; 在中间阶段, 按照式(7)计算每个像素点的特征向量;

c) 根据式(3)计算备选目标区域 X_k^i 与参考目标模板的相似性;

d) 计算 X_k^i 的权值并归一化:

$$\hat{\omega}_k^i = \exp\left\{-\frac{\alpha p(C_k^i, C_r)}{2}\right\} \quad (10)$$

$$\omega_k^i = \hat{\omega}_k^i / \sum_{i=1}^N \hat{\omega}_k^i$$

e) 估计目标中心在实时图像中的位置:

$$\hat{X}_k = \sum_{i=1}^N X_k^i \omega_k^i \quad (11)$$

当目标成像尺寸较大时, 为了抑制红外图像中不断出现的目标细节以及精确定位目标中心, 提出了在高斯图像金字塔上迭代估计目标状态, 实现逐级提高目标状态的估计精度。整个迭代过程如下:

(1) 构造高斯图像金字塔 $I_g(j)$, $j = 0, 1, 2$;

(2) 从第2级(最低分辨率)图像开始;

a) 前一时刻目标状态估计经过1/4缩放, 以此作为粒子滤波器的初始值;

b) 执行基于区域协方差矩阵的目标跟踪算法估计目标状态 $X_k(2)$;

c) 对目标状态估计缩放2倍, 以此为中心在第1级图像的邻域内搜索与参考模板最匹配的目标状态 $X_k(1)$;

d) 同样地, 对目标状态 $X_k(1)$ 缩放2倍, 以此为中心在第0级图像的邻域内搜索与参考模板最匹配

的目标状态 $X_k(0)$, 作为最终的目标状态。

5 更新参考模型

在弹体飞向目标的过程中, 在初始阶段, 距离目标较远, 连续帧间目标的尺度变化都很小。随着目标与导引头的距离由远及近, 目标成像尺寸逐渐变大, 为了保证跟踪窗口始终套住被跟踪目标, 需要自适应跟踪窗, 即跟踪窗的大小随着目标的成像尺寸自适应变化。因此, 跟踪算法需要及时更新目标的参考模型(区域协方差矩阵)。另一方面, 传感器噪声以及目标本身的运动的影响, 要实现稳定的目标跟踪, 也需要更新模板。本文使用最近 t 个时刻获取的目标区域的协方差矩阵 $C_{k-1}, \dots, C_{k-t}$ 的均值作为新的目标特征参考模板 C_r :

$$C_r = \sum_{i=1}^t C_{k-i} / t \quad (14)$$

6 仿真实验

本文提出的算法采用 Matlab 编程实现, 通过在大量红外视频图像中进行目标跟踪实验, 结果证明本算法的有效性和可行性。图1显示了在一段红外末制导目标跟踪视频中基于本算法的检测与跟踪结果。图1(a)显示目标被捕捉, 进入初始跟踪阶段, 此时目标很小(点目标)。随着弹体与目标的距离逐渐缩小目标成像面积逐渐变大, 而且目标的姿态也变化。在实验中, 当目标尺寸大于 6×6 个像素时, 在高斯图像金字塔迭代定位目标, 采用2级高斯图像金字塔以及建立2级目标参考模板。

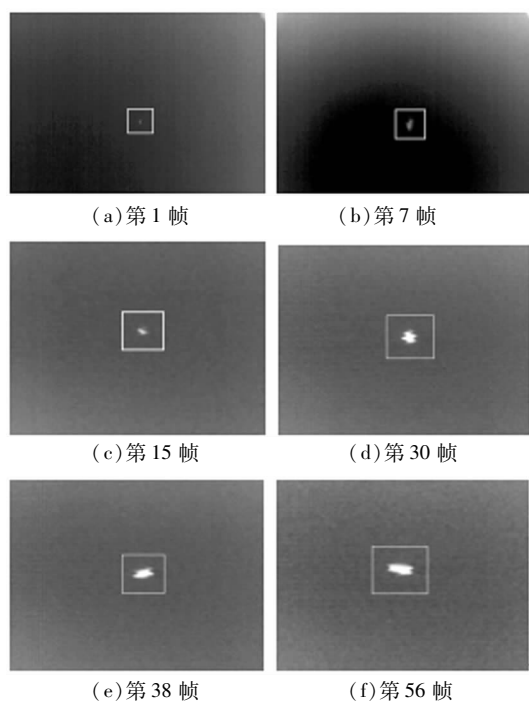


图1 红外末制导目标跟踪结果

Fig. 1 target tracking in infrared terminal guidance

7 结 论

本文在基于区域协方差和高斯图像金字塔的基础上,开发了一种满足红外末制导阶段目标跟踪要求的目标跟踪算法。该算法针对红外末制导阶段目标尺寸快速变化以及目标细节逐渐增多的实际问题,提出了在高斯图像金字塔上迭代定位目标。选择目标区域灰度分布及其拉普拉斯-高斯梯度作为目标区域的特征,构成区域协方差矩阵,以适应目标姿态的变化。实验结果表明,本文提出的方法不但克服目标成像尺寸的变化对跟踪精度的影响,还在一定程度上具有尺度缩放、旋转不变性特点,具有较好的鲁棒性和跟踪精度,比目前的其他目标跟踪算法具有明显的优势。另外,从区域协方差算法的思想来看,其在基于前视模板的目标自动识别中也有很强的应用潜力。

参考文献:

- [1] Porikli F. Achieving real-time object detection and tracking under extreme conditions [J]. Journal of Real-time Image Processing, 2006, 1(1): 33-40.
- [2] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift [C]//IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2000, II: 142-149.
- [3] Veenman C, Reinders M, Backer E. Resolving motion correspondence for densely moving points [C]//IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., 2001, 23(1): 54-72.
- [4] Serby D, Koller-Meier S, Gool L V. Probabilistic object tracking using multiple features [C]//IEEE International Conference of Pattern Recognition (ICPR), 2004: 184-187.
- [5] Elgammal A, Duraiswami R, Harwood D, et al. Background and foreground modeling using nonparametric kernel density estimation for visual surveillance [C]//Proceedings of IEEE, 2002, 90(7): 1151-1163.
- [6] Comaniciu D, Ramesh V, Andmeier P. Kernel-based object tracking [C]//IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., 2003, 25: 564-575.
- [7] Tuzel O, Porikli F, Meer P. Region covariance: A fast descriptor for detection and classification [C]//Proc. 9th European Conf. on computer vision, Graz, Austria, 2006: 589-600.
- [8] Forstner W, Moonen B. A metric for covariance matrices. Technical report, Dept. of Geodesy and Geoinformatics [R]. Stuttgart University, 1999.