

基于 OpenCV 的红外弱小运动目标检测与跟踪

黎志华, 李新国

(西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对信噪比低、背景和噪声干扰严重的红外图像, 根据图像序列中运动目标的帧间相关特性以及噪声的不相关理论, 基于 OpenCV (Open Source Computer Vision Library) 计算机视觉库, 提出了一种弱小目标的检测算法, 并对检测到的目标进行了跟踪。采用能量累积的方法得到背景, 然后从原始图像中去除背景, 提高信噪比; 利用目标的帧间相关特性以及运动信息去除噪声; 最后通过 Kalman 滤波算法来对检测到的目标进行跟踪。实验结果表明: 该检测算法能有效地从序列图像中提取出弱小运动目标, 跟踪算法也能实时地进行跟踪并在目标被遮挡时准确地预测出目标位置。

关键词: 目标检测; 目标跟踪; 卡尔曼滤波; 开源计算机视觉库

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2561-05

Infrared small moving target detection and tracking based on OpenCV

Li Zhihua, Li Xinguo

(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For infrared image which is characterized by low SNR and serious background and noise disturbance, according to the correlation of moving target frame-to-frame and the irrelevance of noise in sequential images, based on Open Source Computer Vision Library, a detection algorithm for small target was proposed and the detected target was tracked. By using energy accumulation method, background of image was got and then removed from original image, image SNR was improved. Noise was removed via the correlation of target frame-to-frame and the movement information. At last, the detected target was tracked by Kalman filter algorithm. The experimental results show that this detection algorithm can effectively find small moving target from sequential images, the tracking algorithm can track in real time and forecast the position accurately when target is covered.

Key words: target detection; target tracking; Kalman filter; OpenCV

收稿日期: 2013-01-04; 修订日期: 2013-02-10

作者简介: 黎志华(1988-), 男, 硕士生, 主要从事飞行动力学与控制、图像跟踪制导与仿真方面的研究。Email: lizhihuahuzhili@163.com

导师简介: 李新国(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事飞行器系统仿真、虚拟样机技术与图像跟踪制导方面的研究。

Email: fsl804@nwpu.edu.cn

0 引言

红外图像中的弱小目标,目标属性包含“弱”和“小”这两个方面:“弱”是指目标在红外波长上所表现出来的强度弱,具体反映到所拍摄的红外图像上,就是指目标的灰度值低;而“小”则是指目标的成像面积小,具体反映到所拍摄的红外图像上,就是指目标所占的像素数目少。

由于红外弱小目标具有成像面积小、形状特征微弱、细节特征缺失、信噪比低等特点。因此,红外弱小目标的检测一直都是红外制导研究和应用中的技术难题。特别是当目标和成像系统的相对位置较远时,目标在视场中一般呈点状,在复杂背景低信噪比下,目标极易被淹没在强噪声中。对红外弱小目标的检测,关键是将目标从由地物和云团等造成的复杂背景以及成像系统各个组成单元产生的噪声中有效地分割出来。

目前常用的目标检测算法比较多,按照所需图像序列的帧数可分为单帧处理算法和多帧能量累积算法^[1];按照滤除对象的不同可分为滤除噪声的算法和滤除背景的算法^[2];按照检测与跟踪的顺序可分为先检测后跟踪的算法和先跟踪后检测的算法^[3]。这些算法都有其独有的优势,也都有一定的局限性,如滤除噪声的算法在图像中存在较强的背景干扰时,往往检测效果不佳;滤除背景的算法难以区分目标与强噪声点;先检测后跟踪的算法容易实现,但要求目标信噪比较高;先跟踪后检测的算法能在复杂背景中实现弱小目标的检测与跟踪,但对硬件有一定要求。为了提高检测效率,现在一般将上述算法结合起来使用,针对低信噪比图像序列,在多帧能量累积的基础上先滤除背景,再去除噪声的算法越来越普遍,检测与跟踪之间的界限也越来越模糊。

针对红外弱小运动目标的特点,文中提出了以下检测和跟踪算法:对图像进行配准,切割出大小一致的所需图像;利用配准后的图像序列进行能量累积,得到背景并从原始图像中去除背景;选择合适的阈值对去除背景后的图像序列进行二值化;根据目标的帧间相关特性^[4]以及噪声的不相关理论,结合目标的运动信息去除噪声,从而有效地从序列图像中提取出目标;设计合适的 Kalman 滤波器对检测到

的目标进行跟踪。

1 OpenCV 简介

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) 是用于计算机视觉的函数库,由 Intel 微处理器研究实验室(Microprocessor Research Lab)的视觉交互组(The Visual Interactivity Group)开发。OpenCV 提供了针对各种形式的图像和视频源文件的帧提取函数和很多标准的图像处理算法,这些函数都可以直接应用在具体的程序开发项目中。

OpenCV 使用 C/C++ 编写,包含 300 多个图像处理函数,由以下几个独立的子库组成:(1) CXCORE:一些基本函数(各种数据类型的基本运算等);(2) CV:图像处理和计算机视觉算法(图像处理、结构分析、运动分析、物体跟踪和模式识别等);(3) HIGHGUI:用户交互部分(图形界面、图像视频输入输出和系统调用函数等);(4) CVAUX:即将被淘汰的算法和函数以及新出现的实验性的算法和函数(如三维跟踪等);(5) CVCAM:摄像机接口(在 1.0 以后的版本中被移除)。

2 目标检测

2.1 图像配准及切割

构造大小为 $M \times M$ 的模板,对各帧图像进行模板匹配配准,配准时,将模板叠放在图像上,自上而下自左而右的平移,平移前,将模板每个像素的灰度值与图像上对应像素的灰度值相乘,结果进行累加,取相关函数为:

$$R(i, j) = \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M S(i+l, j+m)W(l, m) \quad (1)$$

式中: (i, j) 为各帧图像模板覆盖下那一块子图左上角的坐标; (l, m) 为像素点在模板内的坐标; $W(l, m)$ 为模板像素点的灰度值; $S(i+l, j+m)$ 为各帧图像模板覆盖下相应像素点的灰度值。当相关函数 $R(i, j)$ 取得最大值时,配准成功,以模板的中心位置为参考点,切割出大小一致的所需图像。

2.2 多帧能量累积去除背景

对于切割后的图像序列而言,背景静止不动,目标按照其固有规律运动,而噪声的位置以及强弱则具有很大的随机性。在图像处理中,多帧能量累积就是将连续几帧图像的对应像素点累加,然后求均值^[5]。

经过 m 帧累加,噪声因为相互抵消而减弱,标准方差降为 $1/\sqrt{m}$,弱小运动目标的强度也降为原来的 $1/m$,而对于图像中静止不动的点,处理后的输出信号不变。此时可以得到平滑的背景图像。用原图像序列分别减去背景图像,就可得到含有目标点以及随机噪声的图像,从而去掉静止的不动点。

在 OpenCV 中,可通过如下 3 个函数来完成这一过程:用 `cvAcc()` 累积原始图像;用 `cvConvertScale()` 求均值,得到背景图像;用 `cvAbsDiff()` 计算原始图像与背景图像的差值,得到目标与噪声,去除背景。

2.3 阈值分割并二值化

为了更好地检测目标,选用一个适当的作为图像分割的阈值,对经过以上处理的图像进行分割,得到二值化图像。阈值 T 选择的合适与否会直接关系到图像的错检概率与漏检概率。

文中基于 OTSU 算法^[6]进行改进来完成阈值 T 的选取。OTSU 算法也称为最大类间方差法或最小类内方差法,是目前广泛使用的阈值分割法之一。该方法基于图像的灰度直方图,以目标和背景的类间方差最大或类内方差最小为阈值选取准则,按图像的灰度特性,将图像分成背景和目标两部分。

将图像前景(即目标)和背景的分割阈值记作 T ,将属于前景的像素点占整幅图像的比例记为 ω_0 ,其平均灰度记为 μ_0 ,属于背景的像素点占整幅图像的比例记为 ω_1 ,其平均灰度记为 μ_1 ,将图像的总平均灰度记为 μ ,类间方差记为 g 。

假设图像的大小为 $M \times N$,将属于前景的像素点个数记为 N_0 ,属于背景的像素点个数记为 N_1 ,那么:

$$\omega_0 + \omega_1 = 1 \quad N_0 \times N_1 = M \times N \quad \omega_0 = N_0 / M \times N \quad \omega_1 = N_1 / M \times N$$

$$\mu = \omega_0 \times \mu_0 + \omega_1 \times \mu_1 \quad g = \omega_0 \times (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 \times (\mu_1 - \mu)^2 \quad (2)$$

采用遍历的方法使得类间方差 g 最大的 T 即为所求阈值。为了满足弱小点目标检测的应用,使检测效果更好,作者在反复试验后作出了如下改进:在所求出阈值 T 的基础上再加上一个阈值补偿值 ΔT , ΔT 的取值范围为 30~50。

二值化的过程如下式所示:

$$R_k(x, y) = \begin{cases} 1 & D_k(x, y) > T \\ 0 & D_k(x, y) \leq T \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D_k(x, y)$ 为去除背景后图像在点 (x, y) 处的灰度值, $R_k(x, y)$ 则为二值化后图像在点 (x, y) 处的取值。

在 OpenCV 中,可通过函数 `cvThreshold()` 来实现

二值化。

2.4 目标检测

通过以上分割提取的图像中包含有目标点和高频噪声点。高频噪声点的多少取决于阈值的大小,这种高频噪声点在单帧图像上与目标点的形状类似,都表现为点状,但也有各自不同特点,从序列图像看,目标点的像素在各帧图像的分布有一定的规律,由于目标的运动速度变化不大,方向也比较稳定,各帧之间有一定的相关性,而噪声则大多随机分布,所以根据目标帧间相关的特点可进一步去除噪声^[7]。

基于目标运动速度的检测:对二值化后灰度为 1 的像素点,检查其相邻帧图像相同位置的 $n \times n$ 邻域内是否存在目标点(n 的大小根据目标的运动速度确定),若没有,则该点视为噪声点而去掉,这样可清除大部分的噪声点。这个过程用公式表示为:

$$c(x, y) = \begin{cases} 1 & \Phi(f_i(x, y) - f_c(x_u, y_w)) \leq T_1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Φ 为距离算子; $f_i(x, y)$ 表示第 i 帧图像内灰度为 1 的点; $f_c(x_u, y_w)$ 表示第 i 帧图像的相邻帧在 (x, y) 邻域内灰度为 1 的点 $c(x, y)$ 表示该点的灰度值; T_1 由目标速度大小决定,第一帧只检查下一帧,最后帧只检查上一帧。

基于目标运动方向的检测:对剩余灰度为 1 的像素点,检查其相邻两帧图像相同位置的 $n \times n$ 邻域内目标点与该点的梯度是否与运动方向一致,若不一致,则该点视为噪声点而去掉,这样可以清除剩余的噪声点。这个过程也可以用公式表示如下:

$$c(x, y) = \begin{cases} 1 & T_2 \leq \nabla(f_i(x, y) - f_c(x_u, y_w)) \leq T_3 \\ 0 & \text{其他情况下} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ∇ 为梯度算子; T_2, T_3 由目标速度方向决定,第一帧只检查下一帧,最后帧只检查上一帧。

3 目标跟踪

用成像装置对目标进行探测可以得到目标状态参量的测量值。目标的状态参量包括所在的空间位置、运动速度等。由于测量是在各种干扰和噪声条件下进行的,因此应当采用现代跟踪理论中的滤波估值理论,力求排除干扰和噪声的影响,获取对目标运动状态的最佳估计。滤波估值的一般思想是根据目标的运动特性建立运动模型,从而根据运动模型,用第 k 帧的参数去预测第 $k-1$ 帧的参数。

由于弱小运动目标的红外跟踪系统与目标的相对距离较远,同时考虑到红外传感器的探测速率较高,因此相邻帧之间的变化不大,可以采用直线模型进行处理。实际的目标运动轨迹并不完全是一条直线,直线模型适用于高速图像序列的远距离目标跟踪,目标的轨迹通过标准卡尔曼滤波算法来更新^[8]。

动态系统模型为:

$$\mathbf{X}(k)=\mathbf{A}\mathbf{X}(k-1)+\mathbf{w}(k) \quad \mathbf{Z}(k)=\mathbf{H}\mathbf{X}(k)+\mathbf{v}(k) \quad (6)$$

卡尔曼滤波标准方程为:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}(k) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(k-1) \\ \mathbf{P}(k) &= \mathbf{A}\mathbf{P}(k-1)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \\ \mathbf{P}(k) &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H})\mathbf{P}(k) \\ \mathbf{K}(k) &= \mathbf{P}(k)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{P}(k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \\ \hat{\mathbf{X}}(k) &= \hat{\mathbf{X}}(k) + \mathbf{K}(k)[\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k)] \end{aligned} \quad (7)$$

观测变量 $\mathbf{Z}(k)=[x(k), y(k)]^T$, 状态变量 $\mathbf{X}(k)=[x(k), \hat{x}(k), y(k), \hat{y}(k)]^T$ 。

$$\text{状态转移矩阵 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 观测矩阵 } \mathbf{H} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

$\mathbf{w}(k)$ 和 $\mathbf{v}(k)$ 是方差为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 的零均值高斯白噪声,称为过程激励噪声和观测噪声; $x(k)$ 、 $\hat{x}(k)$ 、 $y(k)$ 和 $\hat{y}(k)$ 是目标在 x 轴的位置与速度和目标在 y 轴的位置与速度; $\mathbf{K}(k)$ 和 $\mathbf{P}(k)$ 分别为最优增益矩阵和估计误差方差阵。

在距离较远时,红外目标的机动性弱,可以通过前述基于匀速直线运动模型的目标跟踪得出的目标状态向量的滤波值,外推预测得出目标在下一帧的可能位置。在目标被检测并跟踪上之后,若目标被短暂遮挡,可以根据外推值确定目标下一步可能的位置,当目标再次出现时,仍可稳定跟踪而不至于丢失目标。

OpenCV 提供了 4 个与应用 Kalman 滤波器直接相关的函数:cvCreateKalman() 产生和返回一个 CvKalman 数据结构类型的指针;cvReleaseKalman() 则被用来删除这个结构;cvKalmanPredict() 计算下一时间点的预期值;cvKalmanCorrect() 校正新的测量值。另外,通过函数 cvRectangle() 来给出跟踪窗口。

4 仿真结果

根据文中提出的算法对红外序列图像中的弱小

目标进行检测与跟踪,结果如图所示,其中图 1 是图像序列中第 12 帧与第 18 帧的原始图像(已经过配准与切割);图 2 是这两帧去除背景并经过阈值分割后的二值化图像;图 3 是利用目标的帧间相关性对这两帧去除噪声后的图像;图 4 是正常情况下 Kalman 滤波对这两帧的跟踪图像;图 5 是目标被遮挡情况下 Kalman 滤波对图像序列第 21 帧与第 22 帧的跟踪图像。

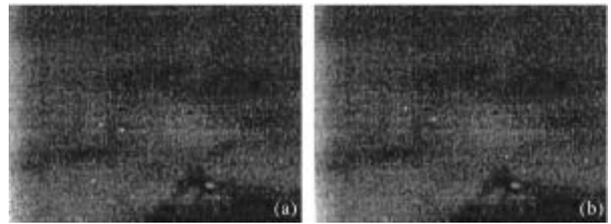


图 1 原始图像

Fig.1 Original image

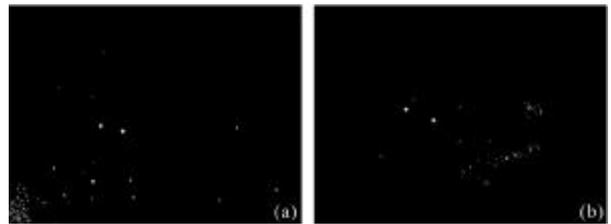


图 2 去除背景并二值化后的图像

Fig.2 Binarization result of image after background was removed

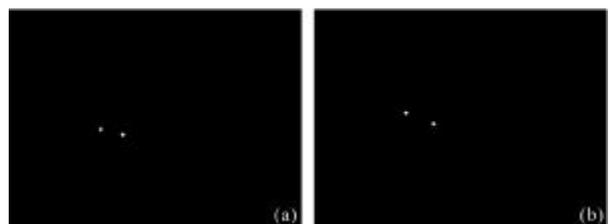


图 3 去除噪声后的图像

Fig.3 Image after noise was removed

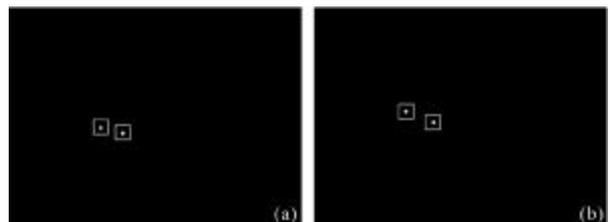


图 4 正常情况下的跟踪图像

Fig.4 Tracking image under normal condition

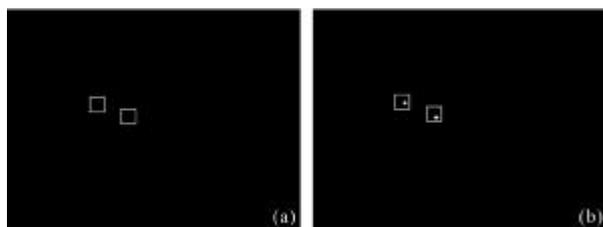


图 5 目标被遮挡情况下的跟踪图像

Fig.5 Tracking image when target was covered

从图 2 可以看出, 去除背景并阈值分割后的二值化图像中存在很多噪声点, 目标湮没在其中; 图 3 中, 利用目标的帧间相关性, 噪声点被去除, 而目标则被很好的识别出来; 从图 4 可以看出, 在正常情况下, 很好地实现了跟踪; 从图 5 可以看出, 在目标被遮挡的情况下, 目标位置可通过外推预测得到, 当目标再次出现时, 依然可以稳定跟踪。表 1 是一次跟踪过程中实际值与预测值的对照情况。

表 1 一次跟踪过程中实际值与预测值的对照

Tab.1 Comparison between actual value and predicted value during tracking

	Second frame	Third frame	Fifth frame	Tenth frame	Fifteenth frame	Twentieth frame
Actual values of target 1	(100,144)	(100,141)	(100,135)	(100,120)	(100,105)	(100,90)
Predicted values of target 1	(9.10, 130.72)	(91.87, 140.66)	(100.00, 135.22)	(100.10, 120.17)	(100.01, 104.95)	(99.97, 90.07)
Actual values of target 2	(120,146)	(121,144)	(123,140)	(128,130)	(133,120)	(138,110)
Predicted values of target 2	(10.90, 132.57)	(111.14, 143.67)	(123.09, 139.98)	(128.16, 130.03)	(133.08, 119.98)	(138.05, 110.17)

可以看出, 在跟踪的初期, 实际值与预测值之间存在一定的偏差, 但这个偏差会随着跟踪的进行迅速减小, 从第 5 帧开始, 就能稳定地跟踪上目标, 而且跟踪精度很高。

5 结 论

文中针对远距红外目标探测系统在复杂背景和强噪声点干扰环境下弱小运动目标的检测问题, 提出了通过能量累积得到并去除背景, 通过目标的帧间相关特性以及噪声的不相关理论去除噪声的检测算法; 设计出合适的 Kalman 滤波器对检测到的目标进行了

跟踪。仿真结果表明, 检测算法能有效地从序列图像中提取弱小运动目标, 跟踪算法也能实时地进行跟踪并在目标被遮挡的情况下准确地预测出目标位置, 具有算法简单, 运算量较小, 易于工程实现等优点。

参考文献:

- [1] Gao Chenqiang, Tian Jinwen, Wang Peng. Detection algorithm for infrared moving small target based on temporal domain characteristics analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 907-910. (in Chinese)
高陈强, 田金文, 王鹏. 基于时域特性分析的红外运动小目标检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 907-910.
- [2] Yu Jingsong, Wan Jiuqing, Gao Xiulin. Research on dim point moving target detection in infrared image [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(12): 1518-1521. (in Chinese)
于劲松, 万九卿, 高秀林. 红外图像弱小点目标检测技术研究[J]. *兵工学报*, 2008, 29(12): 1518-1521.
- [3] Wang Jianlai, Yang Chunling. Dim moving target detection against sky background in IR image sequence based on GLRT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2546-2551. (in Chinese)
王瞰来, 杨春玲. 天空背景下基于 GLRT 的红外弱小运动目标检测[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2546-2551.
- [4] Xu Jun, Zhou Xiang, Liang Changhong. Algorithm of small target detection in IR image sequences [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4): 390-393. (in Chinese)
徐军, 周翔, 梁昌洪. 红外序列图像弱小目标检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(4): 390-393.
- [5] Liao Bin, Yang Weiping, Shen Zhenkang. Dim target detection algorithm based on multi-frame indexing accumulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(2): 150-153. (in Chinese)
廖斌, 杨卫平, 沈振康. 基于多帧移位叠加的红外小目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(2): 150-153.
- [6] Otsu N. A threshold selection method from graylevel histograms [J]. *IEEE Transactions on System Man and Cybernetic*, 1979, 9(1): 62-66.
- [7] Zhang Cong, Zhang Tianxu. Research on detection and recognition method of moving targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(2): 164-168. (in Chinese)
张聪, 张天序. 运动目标检测与识别方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(2): 164-168.
- [8] Li Jianxun, Zhang Shijun, Cheng Fei, et al. Method of small target detection and tracking from infrared image and its realization[J]. *Aerospace Electronics Information Engineering and Control*, 2006, 28(1): 11-14. (in Chinese)