

红外图像序列运动小目标检测的预处理算法研究*

周卫祥 孙德宝

(华中理工大学自动控制工程系 武汉 430074)

彭嘉雄

(华中理工大学图像识别与人工智能研究所 武汉 430074)

摘要 就如何检测复杂背景下低信噪比的运动小目标展开讨论,提出了用空间高通滤波方法改善图像质量,达到抑制背景噪声,增强小目标的效果,随后用似然比检测理论进行目标的初步分离,接着采用邻域判决的方法实现运动目标的进一步分离,最后用图像流分析法进行目标的最终检测。实验结果表明,该算法能够对小目标甚至是点目标的运动进行可靠的检测。

关键词 目标检测,高通滤波,似然比检测,邻域判决,图像流

分类号 TN911.7

The Study of Preprocessing Algorithm of Small Moving Target Detection in Infrared Image Sequences

Zhou Weixiang Sun Debao

(Department of Automatic Control, HUST, Wuhan, 430074)

Peng Jiexiong

(Institute of PR&AI, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract In this paper, it is discussed how to detect the low SNR small moving target in the condition of complicated background. A space high pass filtering method is presented to improve the image quality for restraining the background noise and enhancing the small target, then the likelihood ratio detection theory is used to pick out a small number of possible moving targets and the neighborhood judging method is presented to pick out the smaller number of possible moving targets. Finally, the true target motion trajectory is detected in multi-frame successive image by use of image flow analysis method. The experiment result indicates that this algorithm can reliably detect small target's motion, even the point target's.

Key words target detection, high pass filter, likelihood ratio detection, neighborhood judge, image flow

复杂背景下的运动小目标检测一直是一个难度相当大的问题。为了对运动目标进行有效的检测,必须利用多帧图像的运动信息,将目标的运动特征和运动轨迹的连续性、一致性结合起来进行考虑。图像流分析法通过分析图像序列中像素的速度场分布,可以检测出目标的运动轨迹。

在红外寻的制导过程中,需要尽快地截获并锁定跟踪目标。为了提高目标检测的速度,目标检测的预处理就显得相当重要。本文采用高通滤波的方法抑制背景噪声,增强小目标,随后用两步分离法筛选出少量候选运动目标点。经过这样的预处理后,用于检测的候选目标点大为减少,为最后采用图像流分析法进行目标点的检测打下了很好的基础。

1 目标检测的预处理

红外图像中的运动目标是一些灰度奇异点,其中也包括强噪声干扰点,这些信号主要包含高频分

* 国家自然科学基金资助项目

1999年4月20日收稿

第一作者:周卫祥,男,1975年生,硕士生

量。因此，首先将原图像进行高频滤波，经过统计分析，可以去除图像中缓慢变化的背景部分和小的噪声干扰点，提取出可能目标点。然后根据目标像素在图像序列中运动的连续性和轨迹的一致性原则，进一步去除其中的不连续点，得到很少量的候选目标点。利用这些为数不多的候选目标点进行图像流分析，避免了直接对全图像作图像流计算，从而大大减少了计算量，提高了处理效率。

1.1 空间高通滤波预处理

我们知道，一幅 $M \times N$ 的自然景物图像可以按照下列模型进行分解^[1]：

$$B(m, n) = S(m, n) + D(m, n), \quad (m, n) \in [0, M - 1] \times [0, N - 1] \quad (1)$$

其中, $S(m, n)$ 是图像的基本特征, $D(m, n)$ 是图像细节和噪声干扰。

对于远距离红外小目标而言，背景中细节成分较少，小目标在图像中可以被看作是噪声点，其中含有大量的高频信息，且与周围背景的相关性小。为了估计 $D(m, n)$ ，将(1)式经过变形得：

$$D(m, n) = B(m, n) - S(m, n), \quad (m, n) \in [0, M - 1] \times [0, N - 1] \quad (2)$$

因此，利用背景像素之间灰度的相关性，目标灰度与背景灰度的无关性，设计一个简单的空间高通滤波器，就可以滤除大量的背景像素，而只保留高频噪声和目标点，实现目标与背景的初步分离。

本文采用如表 1 所示 5×5 高通卷积模板作为空间域高通滤波器冲激响应函数。经分析可发现，模板中心像素权值很大，容易通过；而周围部分权值均为 -1，权值小，不易通过。因此，对于目标点和孤立噪声点，由于信号强度较背景高，因而容易通过滤波器；而对于有一定成像面积的背景，则不容易通过。

表 1 5×5 高通滤波器模板

Tab. 1 The 5×5 template for high pass filtering

-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	25	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1

1.2 运动目标点的初步分离

原图像经过高通滤波器后，得到噪声图 $D(m, n)$ ，其中目标点和强噪声点的 $D(m, n)$ 较大。为了从噪声图中分割出可能目标，我们采用了经典的似然比检测理论^[1]。

如果 $D(m, n)$ 是背景噪声，则其统计分布类似零均值高斯分布；如果 $D(m, n)$ 是目标，则其统计分布不同，可假设目标灰度的统计分布是一种均匀分布。我们用 $P(z = m_1)$ 和 $P(z = m_2)$ 来分别表示背景噪声和目标的概率密度函数：

$$P(z = m_1) = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

$$P(z = m_2) = \frac{1}{k} \quad (4)$$

式中 z 是 $D(m, n)$ 的一个观测值； m_1 代表背景噪声出现； m_2 代表目标出现。 k 为 z 的分布范围(原图灰度级为 255 时， $-255 \leq z \leq 255, k = 511$)。根据似然比检测理论有： $\frac{P(z = m_1)}{P(z = m_2)} < \lambda$ 时，该点为目标；

$\frac{P(z = m_1)}{P(z = m_2)} > \lambda$ 时，该点为背景噪声；式中 λ 为决策门限。本文选择 $\lambda = 0.003$ ，即认为经高通滤波后的图像中任一灰度 z ，目标与背景噪声出现的先验概率之比为 3 : 1000，实验结果表明，这是合理的。

将(3)式和(4)式带入 $\frac{P(z = m_1)}{P(z = m_2)} < \lambda$ 并化简得到判断该点为目标点的限制条件：

$$z^2 > -2\sigma^2 [\ln(\frac{1}{2\pi\sigma\lambda}) - \ln k] \quad (5)$$

因为目标在图像中只占有极少几个像素，故背景噪声的均值和方差可通过对所有 $D(m, n)$ 统计得到。

经过上述门限处理后，我们得到一个去除背景的可能目标图像序列，可能是目标的点保留其灰度值，其余点的灰度值置零。

1.3 运动目标点的进一步分离

经过高通滤波，利用似然比检测理论分离目标后，

图像中仍可能混杂有大量的强噪声点。我们知道，小目标的运动具有运动的连续性和轨迹的一致性特征，因此，噪声点的运动是随机的，不能形成连续运动轨迹；而目标点的运动则是有规律的，具有连续的

运动轨迹。基于以上考虑,下面提出一个判别准则。将第一步分离所得到的可能目标点在此判别准则下进行筛选,实现目标点与噪声点的进一步分离。

判别准则:如果候选目标点在下一帧图像同一位置的某一邻域内仍然出现,则判断该点为目标点,予以保留;否则判断该点为噪声点,予以剔除。

具体做法:设 T 是经过第一步分离后得到的候选目标点集合, $P(i, j, k)$ 是 T 中的任意一点,表示第 k 帧图像在位置 (i, j) 处的候选目标点, $N(i, j, k)$ 表示 P 点的某一邻域(3×3 或 5×5), $N(i, j, k+1)$ 是第 $k+1$ 帧图像在同一位置 (i, j) 处的邻域。将 $N(i, j, k+1)$ 中的所有像素值与零进行比较,如果至少有一个大于零,则判断 P 点为目标点,保留在 T 中;如果全为零,则判断 P 点为噪声点,将其从 T 中剔除。处理流程如图 1 所示。

2 基于图像流法确定真正目标

所谓图像流^[2],就是指图像平面上的速度场,它是由于场景中的运动模式投影到图像平面上产生的。图像流分析法是一种小区域视觉处理方法,它比基于图像特征的匹配法更加局部化,但又不及基于像素的差分图像法。通过对序列图像进行图像流分析,可以有效地检测出图像中目标的运动轨迹。

图像流分析法的基本模型是图像流约束方程^[2]。设 $E(x, y, t)$ 表示在时刻 t 图像平面中 (x, y) 点上的图像辐射,则图像流约束方程如下:

$$E_x \cdot u + E_y \cdot v + E_t = 0 \tag{6}$$

其中, E_x, E_y, E_t 分别是灰度函数 E 关于 x, y, t 轴的偏导, u, v 是目标在 x, y 轴上的速度。上式建立了图像平面上任意一点 (x, y) 的图像辐射的时空梯度变化与该点瞬时速度 (u, v) 之间的相互关系。它要求景物的灰度函数处处可导,否则会由于景物灰度函数本身的不连续,或阻塞遮挡造成的灰度不连续,在偏导计算中会导致冲激函数的出现而使(4)式不成立。为了解决这一问题, Schuck 运用格林定理对空间点运动轨迹进行积分,得到了一种适合灰度不连续情况的推导^[2]。

图像流约束方程中,灰度函数 E 关于 x, y, t 轴的偏导可以用图像序列中相邻两帧图像 $\{E(x_i, y_j, t_k) \mid i = 0, 1, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n\}$ 和 $\{E(x_i, y_j, t_{k+1}) \mid i = 0, 1, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n\}$ 的四个相邻位置关于 x, y, t 方向的一阶差分来估计:

$$E_x = \{ [E(x_{i+1}, y_j, t_k) - E(x_i, y_j, t_k)] + [E(x_{i+1}, y_{j+1}, t_k) - E(x_i, y_{j+1}, t_k)] + [E(x_{i+1}, y_j, t_{k+1}) - E(x_i, y_j, t_{k+1})] + [E(x_{i+1}, y_{j+1}, t_{k+1}) - E(x_i, y_{j+1}, t_{k+1})] \} / 4 \tag{7}$$

$$E_y = \{ [E(x_i, y_{j+1}, t_k) - E(x_i, y_j, t_k)] + [E(x_{i+1}, y_{j+1}, t_k) - E(x_{i+1}, y_j, t_k)] + [E(x_i, y_{j+1}, t_{k+1}) - E(x_i, y_j, t_{k+1})] + [E(x_{i+1}, y_{j+1}, t_{k+1}) - E(x_{i+1}, y_j, t_{k+1})] \} / 4 \tag{8}$$

$$E_t = \{ [E(x_i, y_j, t_{k+1}) - E(x_i, y_j, t_k)] + [E(x_{i+1}, y_j, t_{k+1}) - E(x_{i+1}, y_j, t_k)] + [E(x_i, y_{j+1}, t_{k+1}) - E(x_i, y_{j+1}, t_k)] + [E(x_{i+1}, y_{j+1}, t_{k+1}) - E(x_{i+1}, y_{j+1}, t_k)] \} / 4 \tag{9}$$

从(6)式可以看出,图像流约束方程实际是速度平面 (u, v) 上的直线方程。如果考虑图像序列中连续的 $J (J \geq 2)$ 帧图像,并假定目标的运动速度在这 J 帧图像里近似保持不变,则对于真正的运动目标点来说,其在连续的 J 帧图像里的 J 条运动约束直线必定在速度平面上近似相交于一点,如图 2 所示。而对于噪声点来说,由于其出现的随机性,因此即使某些噪声点能够在少数的连续几帧中形成速度聚合点,但随着序列长度的增加,这些噪声点既不可能在图像平面上形成连续的运动轨迹,也不可能

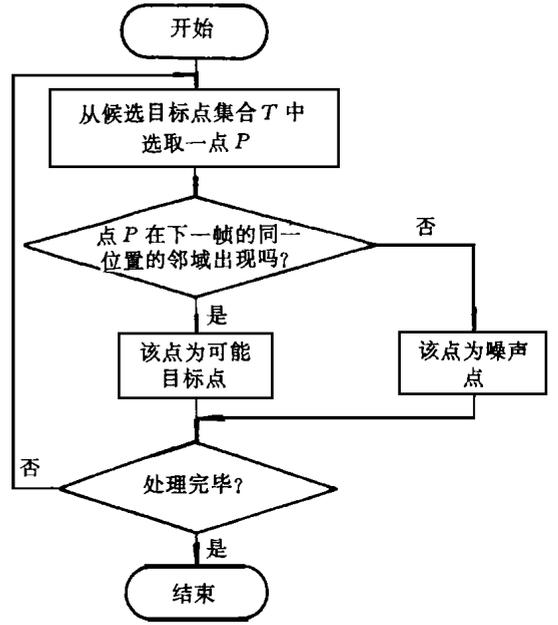


图 1 候选目标点的进一步分离流程

Fig. 1 The flow chat of the further extraction of candidate target points

平面上形成速度聚合点。这样,就可以在候选目标点集合中有效地去除噪声干扰点,检测出真正的运动目标。

3 实验结果

实验采用连续的 320×240 红外图像序列。首先将图像进行高通滤波,通过统计分析消除缓慢变化的背景部分和弱噪声干扰点,然后根据空间连续性原则去除运动杂乱的强噪声点,提取出少量的候选目标点,最后采用图像流法对图像序列进行分析,检测出运动目标及其运动轨迹。

计算机模拟实验结果如图3所示,其中,(a)是原始图像,(b)是经过初步分离得到的结果,(c)是经过进一步分离得到的结果,(d)是最终的检测结果。可以看出,经过两步分离,候选目标像素点变得很少,从而极大地减小了图像流分析的计算量,提高了检测精度。

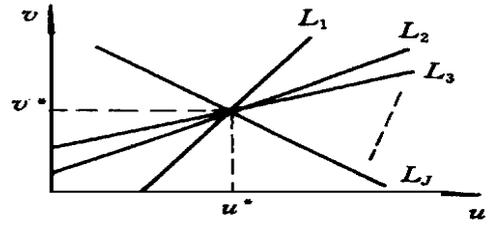


图2 运动约束直线在速度平面上的聚集
Fig. 2 The focusing of motion constraint line on the velocity plane

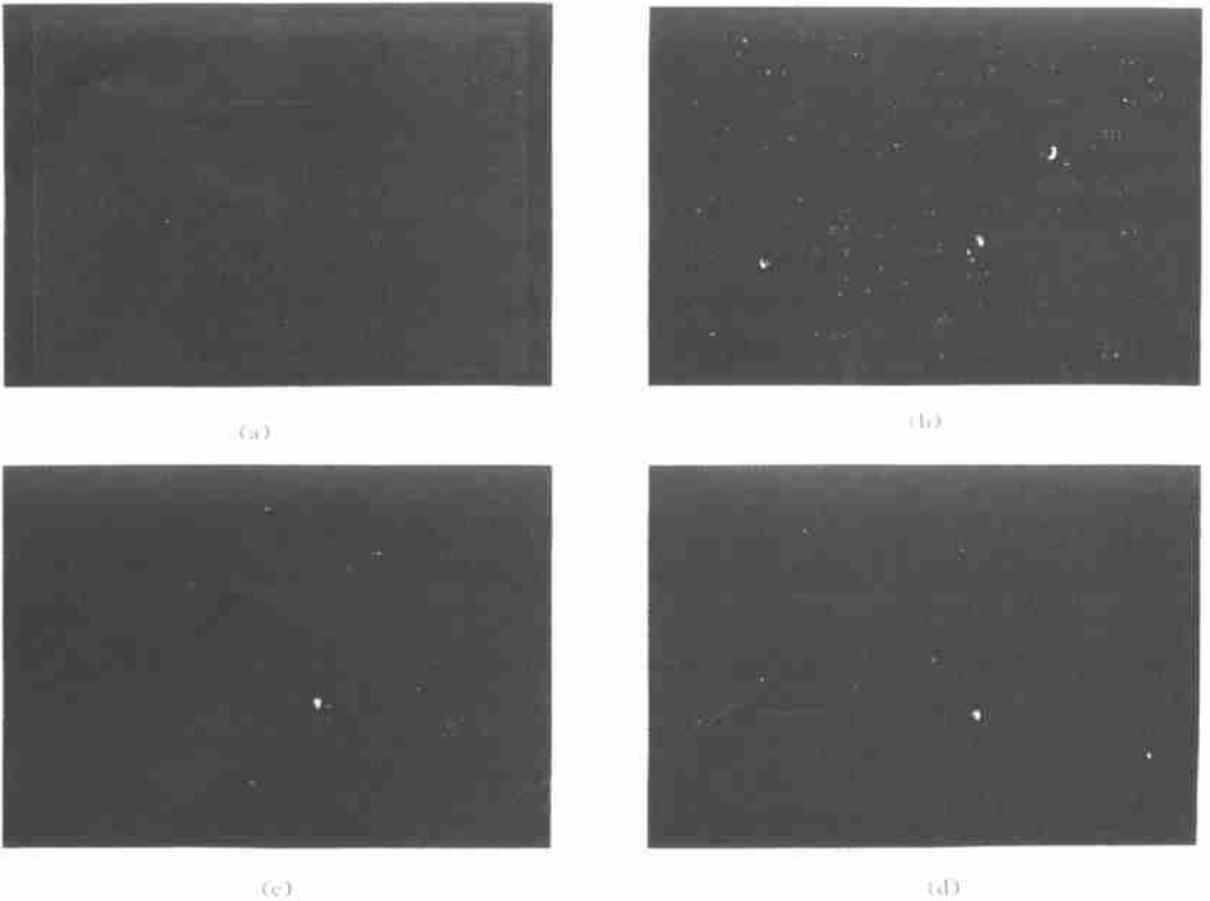


图3 计算机模拟实验结果
Fig. 3 The experiment results of computer simulation

参考文献

- 1 彭嘉雄,彭铁. 弱目标检测的图像流法,红外与激光工程,1996,25(4):34~40
- 2 Schunck B G. The Image Flow Constraint Equation. CVGIP, 1986, 35(1): 20~46
- 3 李吉成,沈振康. 红外起伏背景下运动点目标的检测方法. 红外与激光工程,1997,26(6):8~13
- 4 熊辉,沈振康. 低信噪比抖动红外点目标的检测. 国防科技大学学报,1998,20(2):54~59