

一种空间弱小目标的图像检测方法

王学伟, 李德明

(海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要:针对天基空间观测图像背景缓慢运动和目標信噪比低的特点,提出了一种滤除星空背景检测太空弱小目标及获取运动轨迹的方法。通过对动态背景序列图像的背景恒星配准及背景消除,得到了目标图像。通过基于目标特征的滤波,并用质心法计算出每帧目标代替点得到简洁的目标轨迹图像。最后使用 Hough 直线检测算法和最小二乘法提取目标轨迹。实验结果验证了该方法的有效性。

关键词:轨迹提取;图像配准;空域滤波;Hough 变换

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Dim Target Detection Algorithm for Space Surveillance Images

WANG Xue-wei, LI De-ming

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: For detecting moving dim spatial target in dynamic background space observation serial images, a method that combined image preprocessing and spatial filter based on target feature is proposed. The method include following steps. First, image preprocessing, it include background stars registration, background mask generation and background subtraction. Second, enhancing image by spatial filter based on target feature, detecting the maximum 8-connected regions, getting target's coordinate through centroid method. At last, trajectory extraction through linear Hough transform and least square method. The effect of the detection method is verified by the result of experiments.

Key words: trajectory extraction; image registration; spatial filter; Hough transform

1 引言

天基空间观测图像中目标像素数少,一般不超过 20 个像素,亮度较恒星低,一般只是稍高于图像灰度均值,且图像中噪声多,恒星数量多、面积大、亮度高,目标淹没于背景中,通常人眼观察序列图像亦难以发现目标。星敏感器在对卫星目标的跟踪监视过程中还存在背景和目標同时运动的情况。

目前,这类弱小目标的检测类同于红外图像中弱小目标的检测,大多采用基于序列图像多帧处理的方法,典型的方法有利用多帧累加^[1]得到背景图像、利用帧间差分^[2]或与背景差分提取各帧目标,最后形成轨迹;以及针对低信噪比序列图像的动态规划^[3]、三维匹配滤波^[4]等方法。前一类方法要求图像信噪比较高,即通过预处理后阈值分割能够检测到各帧目标。后一类方法通常用于检测慢速运动目标(甚至帧间运动小于 1 个像素),预处理后疑似

目标多,计算量大,且需要一定的先验信息(目标运动速度、方位)。

本文假设观测图像中的运动目标为地球同步轨道卫星(GEO),从天基卫星对其观测可以认为目标近似匀速直线运动。文中给出了动态星空背景中检测卫星目标运动轨迹的方法。提出了恒星背景的配准和消除方法,将各帧图像与第一帧背景对准,通过分段能量积累提取恒星背景,利用投影叠加得到背景恒星掩模。在此基础上,提出基于目标特征的滑动窗口滤波方法,通过比较窗口和值、窗口中心值与阈值的大小,对目标加以增强。对滤波图像提取最大 8 连通区域质心投影叠加,利用 Hough 直线检测算法和最小二乘法检测修正目标运动轨迹。实验表

作者简介:王学伟(1973-),男,博士,副教授,主要从事精确制导方面的研究工作。

收稿日期:2008-07-10; **修订日期:**2008-09-09

明该方法的有效性。

2 序列图像预处理

序列图像表示为：

$$f(x,y,t) = T(x,y,t) + B(x,y,t) + N(x,y,t), \quad t=1,2,3,\dots,(x,y) \in D_t \quad (1)$$

其中, $T(x,y,t)$ 表示第 t 帧的目标, $B(x,y,t)$ 和 $N(x,y,t)$ 分别表示背景图像和随机噪声, D_t 表示图像在二维坐标系中的范围。预处理的目的是要消除 $B(x,y,t)$, 抑制 $N(x,y,t)$, 提高目标的信噪比 SNR。

2.1 背景恒星配准

图像配准通常要求模版图像小于目标图像, 而这里的背景恒星配准中模版图像和待配准图像大小一样。这里选取第 t 帧图像中灰度值最大的所有非孤立(按照 4 连通定义)像素点生成新的帧, 然后对图像基于这些点配准。这样做是基于空间目标监视图像的特点, ①经过预处理去除图像中星敏感器坏点后, 图像中 $f(x,y,t) = 255$ 的点基本全是恒星, 噪声和目标所占像素数比例很小, 不会影响配准结果; ②满足特点①的像素数量适中、分布均匀, 不会加大运算量, 在一帧 512×512 的图像中灰度值为 255 的有 854 个像素, 占总像素数的 0.326%。这样选择的一个好处是避免因为选择较少的特征点而由于间隔帧数增多而从共同区域 D 消失, $D = (D_t + (\Delta x_t, \Delta y_t)) \cap D_1$ 。

配准常用的相似性测度主要有差值测度、互相关相似性测度、序贯相似性测度、相位相关测度以及一些变形等。此处列举两种常用的测度, 它们的特点是计算简单、快速。

差值测度：

$$R(i,j,t) = \sum_x \sum_y |f^{i,j}(x,y,t) - f(x,y,1)|, \quad (x,y) \in D \quad (2)$$

互相关相似性测度：

$$R(i,j,t) = \frac{\sum_x \sum_y [f^{i,j}(x,y,t) \times f(x,y,1)]}{\sqrt{\sum_x \sum_y [f^{i,j}(x,y,t)]^2} \sqrt{\sum_x \sum_y [f(x,y,1)]^2}}, \quad (x,y) \in D \quad (3)$$

序列图像的第一帧与第二帧配准可选差值测度。根据对空间 GEO 目标和监视平台的相对运动关系以及星敏感器成像特性可以推得背景帧间运动大致范围, 这里取 ± 5 pixel。

背景运动的帧间间隔往往不是 1 个像素的整数倍, 由于帧间背景运动缓慢, 图像帧数较少, 配准时始终以第一帧作为配准的基准图像, 可以减少误差的积累。当前帧由先前帧得出的偏移量外推得出当

前帧的偏移量估计 $(\Delta \hat{x}_t, \Delta \hat{y}_t)$, 然后在一个较小范围内 $(\pm 2\text{pixel})$ 进行匹配得出当前帧偏移量 $(\Delta x_t, \Delta y_t)$ 。为了更精确的得到目标的运动性质, 以最后一帧的偏移量除以帧数求得帧间背景偏移量, 以此来计算各帧背景偏移。

2.2 滤除背景恒星

对背景恒星配准的序列图像, 进行多帧能量积累。设滑动窗口大小为 M , 则能量积累后第 m 帧图像为：

$$f'(x,y,m) = \frac{1}{M} \sum_{t=m-M+1}^m f(x-\Delta x_t, y-\Delta y_t, t) \quad (4)$$

计算可以得出, 图像信噪比提高了 \sqrt{M} 倍。对于累加所得图像使用阈值分割为二值图像 $f'_{bw}(x,y,m)$, 这里我们假设目标所占的位置各帧间不重叠, 即目标帧间速度 V_T 与背景帧间速度 V_B 的合成矢量大小大于目标直径。为了克服噪声的干扰且更好的提取恒星背景, 设置阈值为 $(M-1)(\mu + \sigma) + (\mu + 3\sigma)$, 也可以根据多次实验结果确定 σ 的系数^[5], 这里 μ 为均值, σ 为方差, 对于序列图像均值和方差各帧差异很小, 均由第一帧获得。

由于能量积累后恒星信噪比高, 为了减少计算量, 不采用每帧滑动, 而是间隔 M 帧积累一次, 得到序列 $f'_{bw}(x,y,M), f'_{bw}(x,y,2M), \dots$, 再将所得的累加帧依照配准得到的偏移量按最大值投影叠加, 这样得到二值掩模图像 $B_{bw}(x,y)$, 如图 1 所示。

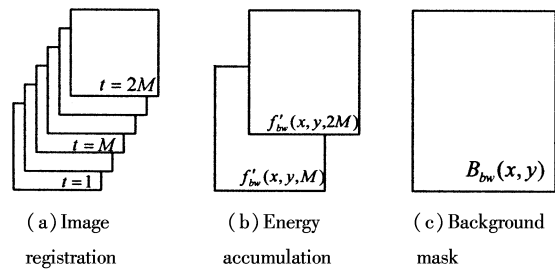


图 1 背景恒星掩模生成流程

对掩模图像中恒星膨胀处理, 能够使后续滤波处理得出的误检目标和真实目标距离增大, 易于剔除。结构元素 B 的选择取决于图像中目标的面积和形状。将各帧图像与取反的掩模图像相乘, 即可消除背景恒星。

$$B_{bw} = B_{bw} \oplus B = \{z | [(B)_z \cap A] \subseteq A\} \quad (5)$$

$$f(x,y,t) = f(x,y,t) \times [\text{NOT}(B_{bw}(x,y))] \quad (6)$$

3 基于目标特征的空域滤波

在空间目标监视图像中, 星呈斑点状的圆形, 星的点扩散函数呈近高斯分布^[6]。空域滤波是在图像空间通过邻域操作完成的, 实际中实现的方式基

本利用模版进行卷积来进行。这里通过选择一个稍大于星点目标的模版,基于目标的特征设计一种运算组合。针对空间目标监视图像,通常卫星目标为 4×4 像素的光斑,这里选择 5×5 像素模版滤波。假设图像为8位灰度图像,运算规则如下:

IF

$$\sum_{i,j} f(x+i, y+j, t) - f(x, y, t) \geq 24(\mu + \alpha\sigma),$$

$$(i, j) = (-2, -1, 0, 1, 2) \quad (7)$$

$$\text{AND } f(x, y, t) \geq \mu + \beta\sigma \quad (8)$$

Is TRUE;

THEN, $f(x, y, t) = 255$;

常系数 α, β 通常由实验确定, $\alpha < \beta$, 此处可取 $\alpha = 1, \beta = 3$ 。

4 运动轨迹检测

对于直线检测, Hough 算法检测速度快, 不易受噪声干扰。在设定极坐标参数 (ρ, θ) 的量化精度后, 能检测出图像中符合要求的所有直线。但当待检测二值图像中像素数较多、图像复杂时, 检测耗时多。

对基于目标特征滤波得到的图像利用255阈值分割, 找出各帧的最大8连通区域, 利用质心法^[7]计算区域中心, 生成目标代替点, 即为目标在图像中的位置。用各帧计算得到的目标代替点投影到一幅图像, 即得到待检测的二值图像。由于其中值为1的像素数极少(等于序列图像帧数), 使用 Hough 算法检测计算量得以减少。若为多目标检测, 可以放宽要求, 比如允许每帧提取8连通面积最大的三个区域。

将 Hough 直线检测算法检测出来的连续的共线点投影到 x 轴, 计算当前目标点与相邻帧目标点 x 坐标差 $|(x_{i+1} - x_i) - (x_i - x_{i-1})|$, 若差值大于某一定值, 可认为是误检点, 同时还需考虑相邻帧 x 差值的平均值。同样对 y 轴投影运算一次。对剩余点用最小二乘法进行直线拟合得到直线方程; 通过计算剩余点 x 轴投影间隔, 得到帧间 x 行方向的运动量和, 最终确定目标点在各帧中的位置。

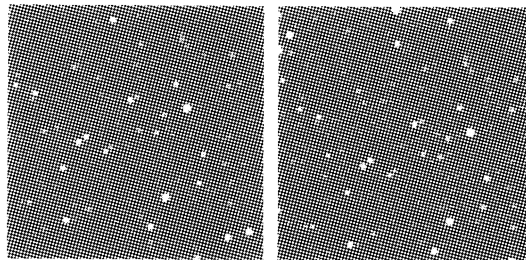
将目标在各帧中的位置与背景恒星在各帧中的位移相减, 从而得到目标相对于恒星背景的运动轨迹。

5 实验及结果分析

为了验证前面提出的检测方法, 我们通过地面天文站采集了多组空间目标观测图像进行实验, 这些图像中目标和背景均缓慢运动, 可以模拟天基观测站对 GEO 卫星的观测。其中一组序列图像如图2所示, 为 256×256 像素的8位灰度图像, 共43帧。信噪比 SNR 定义如下:

$$\text{SNR} = \frac{s - \mu}{\sigma} \quad (9)$$

其中, s 为单帧图像目标平均灰度; μ, σ 为单帧图像的均值和方差。



(a) the 3rd frame(SNR = 0.87) (b) the 16th frame(SNR = 1.01)

图2 序列图像

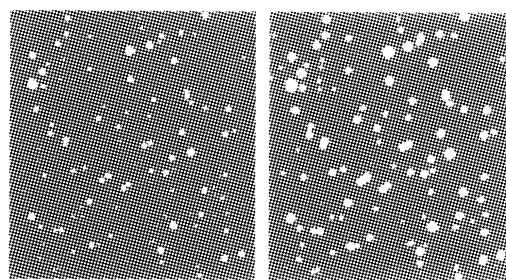
对序列图像按节1.1中的方法计算配准, 这里定义背景相对焦平面向右、向下移动为水平和垂直偏移的正方向。表1列出了部分帧的背景相对于第1帧背景配准的偏移量、由公式(3)计算出的最大相关性测度、以及由第43帧偏移量计算出的各帧背景位移。

表1 背景恒星位移(标称值: pixel)

帧号	配准结果 (x, y)	互相关相似度	背景位移 (x, y)
2	(1, 2)	0.8890	(1.02, 1.74)
3	(2, 3)	0.9006	(2.05, 3.48)
14	(13, 22)	0.8532	(13.31, 22.60)
15	(14, 24)	0.8947	(14.33, 24.33)
16	(15, 26)	0.8894	(15.36, 26.07)
42	(42, 71)	0.8463	(41.98, 71.26)
43	(43, 73)	0.8852	(43, 73)

按照公式(4)计算能量积累图像, 这里我们选择 $M = 5$, 按第2.2节阈值分割图像, 获得9幅分段积累图像, 最后按最大值投影得到背景恒星掩模并用 5×5 的圆形因子进行膨胀运算。如图3所示。

各帧图像按公式(6)运算消除背景恒星, 第16帧运算结果如图4(a)所示。图4(b)所示为按节2方法滤波结果。如图4(c)、(d)所示列举了图像均衡化和高通滤波^[8]的处理结果并计算了SNR。



(a) background stars (b) dilation

图3 背景恒星掩模(299 × 329)

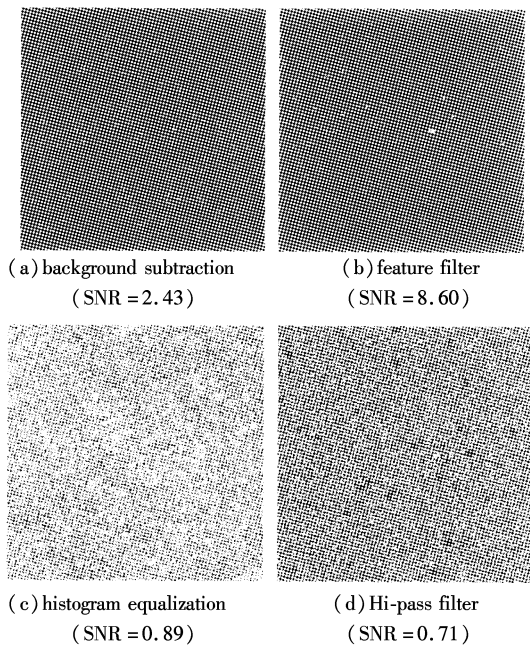


图4 背景恒星消除及滤波(第16帧)

用节3方法检测目标轨迹,结果如图5所示。背景移动速度为(1.02,1.74)像素/帧,目标移动速度(-5.90,-2.43)像素/帧,得到目标相对背景运动速度(-6.92,-4.17)像素/帧。表2列出了部分帧检测结果。

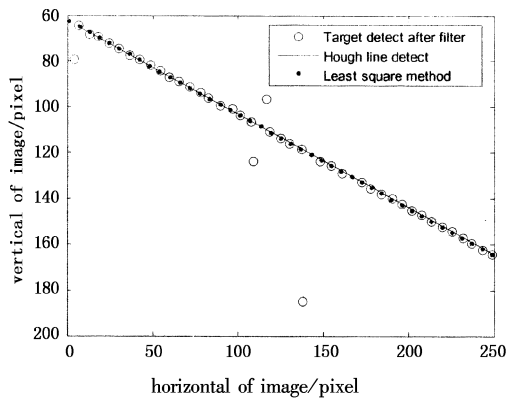


图5 目标运动轨迹

表2 检测结果(标称值:pixel)

帧号	基于特征滤波	最小二乘拟合	目标相对背景运动
2	(243.3,162.7)	(242.98,162.17)	(-6.62,-4.17)
3	(237,159.43)	(237.08,159.74)	(-13.24,-8.34)
14	(172.57,132.71)	(172.2,133.01)	(-86.06,-54.21)
15	(109,124)	(166.3,130.58)	(-92.68,-58.38)
16	(160.83,128.83)	(160.4,128.15)	(-99.3,-62.55)
42	(7,64.67)	(7.00,64.97)	(-272.42,-170.97)
43	(4.33,79.33)	(1.15,62.54)	(-278.04,-175.14)

分析:

1) 比较图2、图4中目标信噪比,滤除恒星背景能提高信噪比;对比以往文献选用的图像均衡化和高通滤波,本文提出的基于目标特征的空域滤波效

果最好,信噪比改善显著。

2) 第43帧中目标误检,是因为配准时该帧图像边缘部分的恒星无法通过掩模消除,该问题易出现在首尾帧。可以通过计算得到的背景运动量,对图像边沿的目标点舍去,然后由整个过程目标的运动外推得到。

3) 第15,19,24帧图像中目标运动到该时刻与背景恒星部分重合,简单地去掉恒星会导致目标残缺(剩余部分像素)。而膨胀后的背景恒星掩模能完全滤除残缺目标,使滤波后检测出来的假目标与真实值距离增大,更易剔除。通过对多组图像的观测和统计,背景恒星与目标重合(相交)的帧数约占总帧数的7%,且不会多帧连续出现,通过插值可以补齐,这不会导致检测结果失真。

4) 配准和滤波后的序列图像计算目标代替点后投影叠加,采用Hough直线检测算法能检测出做近似直线运动的目标轨迹。对比动态规划法检测速度快,易于实现。文中最后采用的最小二乘法能使检测结果更加精确。

5 结论

通过对实验图像的检测,本文给出的针对空间目标监视图像的目标检测方法能获取目标的运动轨迹,具有一定的实用性。Hough变换检测轨迹在确定目标点的精确位置上存在不足,对于最终得到的目标如果能够回到原图中该位置的一个小邻域更精确的获取目标位置,检测精度将更高。另外对于非GEO卫星目标的检测也是今后需要继续研究的内容。

参考文献:

- [1] 叶斌,彭嘉雄. 基于能量积累与顺序形态滤波的红外小目标检测[J]. 中国图像图形学报,2002,7(A)(3): 251-255.
- [2] 陈朝阳,张桂林. 基于图像对称差分运算的运动小目标检测方法[J]. 华中理工大学学报,1998,26(9): 34-38.
- [3] Yair Barniv. Dynamic programming solution for detection dim moving targets[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems,1985,21(1):144-156.
- [4] Reed I S, Gagliardi R M, Stotts L B. Optical moving target detection with 3-D matched filtering [J]. IEEE Trans AES,1988,24(4):327-336.
- [5] 吴巍,彭嘉雄,王海晖. 红外序列图像小目标的特性分析与检测[J]. 红外与激光工程,2002,31(2): 146-149.
- [6] Liebe C C. Accuracy performance of star trackers-a tutorial[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems,2002,38(2):587-599.
- [7] 张健,周晓东,张春华. 空间目标运动轨迹提取算法研究[J]. 红外技术,2007,29(8):459-462.
- [8] 高颖慧,李吉成,沈振康. 红外小目标检测的预处理技术研究. 红外与激光工程[J]. 2004,32(4):154-158.