

基于三角形匹配的空间小目标检测算法

韩艳丽¹, 刘 峰²

- (1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001;
2. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

摘要: 由于天基平台拍摄天空图片时,背景和相机同时发生相对运动,造成相邻帧之间无法通过简单的帧差法得到运动的小目标,造成了空间目标检测的难度。在分析星空图像模型的基础上,提出了一种提取特征点组成匹配三角形的图像配准方法。首先对图像进行预处理,通过最优阈值的选取对单帧图像进行分割,去除背景噪声。将星点按面积大小划分,对符合条件的星点组成特征三角形并在相邻帧中进行匹配得到运动参数。在配准时为了减小计算量,忽略背景插值只针对星点坐标矩阵进行处理。最后通过多帧轨迹关联检测出目标的运动轨迹。仿真实验表明,在运动的序列图像中,该方法能实现高检测率和低虚警率的实时检测。

关键词: 目标检测; 最优阈值; 图像配准; 轨迹关联; 空间目标

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-3134-07

Small targets detection algorithm based on triangle match space

Han Yanli¹, Liu Feng²

- (1. Department Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Postgraduate Training Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: While the star images were pictured by space-based platform, there was a simultaneous relative motion between the background and the camera. The moving small object cannot be obtained through simple frame difference between adjacent frames. Thus, it was difficult to had the space object inspection. Based on the analysis of star image model, proposes an image registration method via extracting feature points and then matching the triangle. Firstly, it was the pretreatment of the images, which was to had a single-frame image segmentation from the selection of optimal thresholds, in order to remove the background noise. Then, divide the stars according to area sizes. For those eligible stars, make the feature triangles, and acquire the parameters from the matching in the adjacent frames. In order to minimize the calculation, the ignorance of the background interpolation was only applied to star coordinate matrices. Finally, detect the moving trace of the object according to multiple-frame connection. As the simulation experiments indicate, in the sequence images, the method can real time inspection in a high detection rate and a low false alarm rate.

Key words: target detection; optimal threshold; image registration; track association; space target

收稿日期:2014-01-05; 修订日期:2014-02-10

基金项目:国家自然科学基金(51005242)

作者简介:韩艳丽(1964-),男,教授,硕士生导师,主要从事图像处理方面研究。

0 引言

空间小目标检测是根据观测序列图像对太空目标进行搜索定位的过程。深空背景中运动的小目标由于距离成像设备较远,目标在图像中只占几个像素的大小,且没有纹理和形状特征,给目标的检测识别带来一定的困难。天基平台可工作在凝视成像和扫描成像两种模式下。凝视模式下平台静止,利用帧插法就可以检测出运动目标。在扫描模式下,不同帧图像存在相对运动,应先对图像进行配准再进行检测,这大大增加了小目标检测的难度。因此在低信噪比条件下,有效实现运动背景下弱小目标的检测是当前的热点问题^[1]。

针对序列图像中检测弱小目标,目前已有多种方法。常用的有:三维匹配滤波算法^[2]、基于多级假设检验算法^[3]、基于动态规划算法^[4]、基于轨迹滤波方法^[5]、基于光流的方法^[6]和基于 Hough 变换^[7]的方法等。基于三维匹配滤波的方法需要预先知道目标运动的速度大小和方向,当速度失配时,输出的信噪比会下降;多级假设检验和动态规划算法由于目标检测轨迹不能间断,因此对目标的信噪比要求较高;轨迹滤波的方法只适用于包含目标和噪声的图像,由于恒星背景和目标在灰度和尺寸上的相似性,导致不能有效检测;光流法假设图像灰度变化完全由于目标和背景的运动所引起,但图像由于传输通道的不同导致每个读出口增益不一样,造成背景不同。Hough 变换法不但能检测连续轨迹可以有效的检测间断轨迹,但由于其存在峰值模糊、短线段淹没、无端点信息等缺点不能直接用于目标轨迹的确定。

针对背景发生运动的星图,文中提出了一种基于改进的三角形匹配的星图配准方法。通过最优阈值划分去除背景噪声,提取星图中星点按一定顺序构成特征三角形的 3 个顶点,利用星点坐标矩阵进行相邻帧的配准,得到运动参数,通过多帧轨迹关联检测目标。

1 星图特性分析

星空图像由星空背景、星空中大量的恒星、弱小目标以及由成像设备和宇宙射线引入的噪声组成。其数学模型可以描述为

$$f(x, y, t) = f_B(x, y, t) + f_S(x, y, t) + f_T(x, y, t) + n(x, y, t) \quad (1)$$

式中: $f_B(x, y, t)$ 为深空背景灰度值; $f_S(x, y, t)$ 为恒星背景灰度值; $f_T(x, y, t)$ 为目标灰度值; $n(x, y, t)$ 为噪声灰度值。 x, y 表示图像中的像素坐标, t 表示序列图像的帧数。

星空图像中,恒星和弱小目标其灰度分布可近似的看作一个对称的高斯曲面,曲面高度代表星的亮度,曲面所占面积代表星的大小。图 1 为恒星和目标成像的灰度分布示意图,图 1(a)为恒星图像,图 1(b)为恒星灰度分布图,图 1(c)为小目标图像,图 1(d)目标灰度分布图。图 2(a)为一帧完整的星空图像,图 2(b)其灰度分布示意图,可以看出图像灰度分布大多集中在低灰度区,即图像中背景占据了大部分像素且呈高斯分布。目标与恒星在高灰度区均为白色亮点且形状特性很接近,难以从单帧图像中区分。

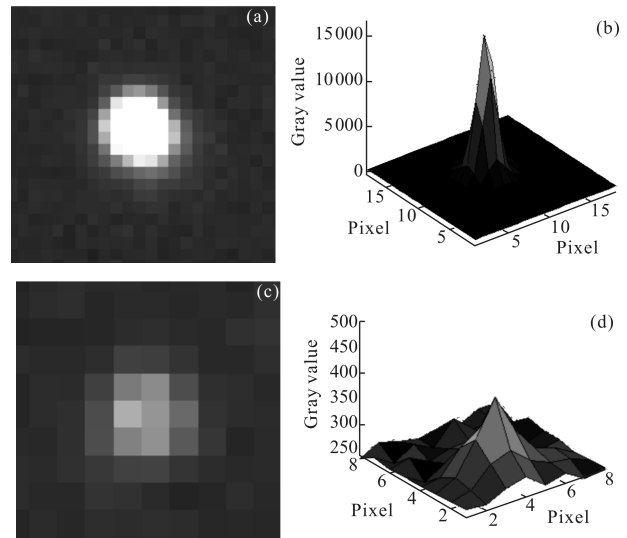


图 1 恒星和目标成像灰度分布

Fig.1 Gray distribution of star and targets

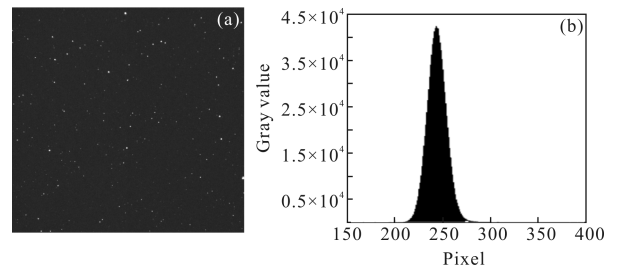


图 2 完整星空图像及灰度分布

Fig.2 Space image and gray distribution

2 目标检测

2.1 单帧图像分割

为了将候选目标分离出来,应先对单帧图像进行分割去除星空背景。最常用的方法是根据目标,星

点,噪声等的灰度特性,合理的选择一个阈值,对图像进行二值化处理滤除背景。在目标信噪比较低时,与背景灰度值有部分交错,如果阈值过小会留下大量的噪声和星象边缘,如果阈值过大则会滤掉部分弱小目标。下面通过推导得到划分图像背景的最优阈值。

图 2 所示为星空图,假定一幅图主要有两类灰度区域,背景低灰度区和恒星目标组成的高亮区。将两者的直方图看作概率密度函数 $p(z)$ 的近似,则图像的混合概率密度函数为:

$$p(z)=P_1p_1(z)+P_2p_2(z)=\frac{P_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1}\exp\left[-\frac{(z-\mu_1)^2}{\sigma_1^2}\right]+\frac{P_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}\exp\left[-\frac{(z-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right] \quad (2)$$

式中: μ_1, μ_2 分别为背景和目标区域的平均灰度值; σ_1, σ_2 为对应的方差值; P_1, P_2 为对应灰度值的先验概率。在方差相等的情况下可求得一个最优阈值:

$$T_{\text{optimal}}=\frac{\mu_1+\mu_2}{2}+\frac{\sigma^2}{\mu_1+\mu_2}\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (3)$$

确定公式(3)中的最优值需要的限制条件太多。

通常情况下 CCD 内部噪声可认为是加性噪声,其分布符合均值为 μ , 标准差为 σ 的高斯分布。根据概率论知识,高斯分布在 $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ 之间的概率为 99.7%, 在 $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$ 之间的概率为 95%, 在 $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ 之间的概率为 69%, 因此利用阈值 $T=\mu+3\sigma$ 可以滤除大部分背景噪声。用求得的阈值 T 对图像进行分割去除背景,结果如图 3 所示,图 3(a)为原图像,图 3(b) 为去除背景后的图像。

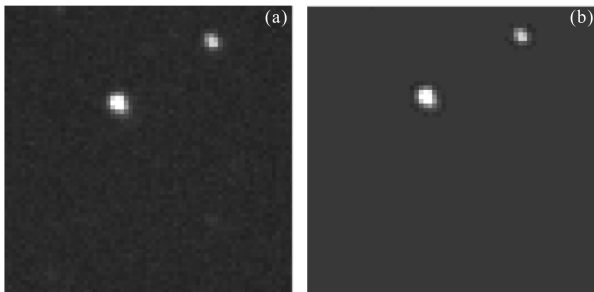


Fig.3 利用阈值去除背景后的图像

Fig.3 Space image after removal background with threshold

2.2 提取特征点及三角形匹配

利用分割后像素的区域连通性提取图像中的星点,将星点存入数组集合中,并提取各个星点的特

征,作为后续三角形匹配的依据。包括星点坐标:确定星点包含的像素后,可以利用质心法确定星点中心坐标,可以达到亚像素的精度,计算公式如下:

$$x_0=\frac{\sum_{x=1}^m\sum_{y=1}^n f(x,y)x}{\sum_{x=1}^m\sum_{y=1}^n f(x,y)}$$

$$y_0=\frac{\sum_{x=1}^m\sum_{y=1}^n f(x,y)y}{\sum_{x=1}^m\sum_{y=1}^n f(x,y)} \quad (4)$$

星点面积:统计星点所占的像素数作为星点的面积,灰度和:将星点所占各像素的灰度值累加起来作为该星点的灰度和。将检测出的每一个星点的这些特征存储起来,数据结构定义如下:特征三角形匹配的步骤如下:

Star_region{centroid_x, centroid_y, Area, sumpixel}

(1) 当检测到亮点面积 $\text{Area}>20$ 时,提取亮点信息存入数组。在数组中,将星点按照灰度值的降序进行排列。数组中包含恒星、目标和较大的噪声点。

(2) 选择高亮恒星点作为三角形匹配的候选点,设定阈值 K ,使 $\text{sum_region}=K\times(\mu+3\sigma)$, 值的大小决定候选星点数量的多少。 K 值太大,得到的候选星点较少,当帧间发生运动时,可能无法得到匹配的三角形, K 值过小,得到的星点过多,组成过多的三角形,增加计算量。

(3) 将候选星点按照灰度和从大到小的顺序排列,剔除三点共线和图像边缘的点,从上到下遍历剩余的点组成三角形的 3 个顶点。选择前 20 个三角形,将其 3 个顶点坐标和三边长度存到如下结构中。

Frame_triangle{star1, star2, star3, a, b, c}

(4) 对下一帧图像采用相同的方法提取 20 个三角形并将相应的数据存储起来。

(5) 在第一幅图像中选择第一个三角形,当满足如下条件时,将其作为第一帧的基准三角形,否则继续检查下一个三角形。

$$a>100 \ \& \ b>100 \ \& \ c>100$$

$$a+b-c>50 \ \& \ b+c-a>50 \ \& \ c+a-b>50$$

(6) 遍历第二幅图像的三角形,当三边长与基准三角形三边长度的差均不大于 2 个像素时,判断为两个三角形匹配成功。提取两幅图像中三角形的 3

个顶点作为基准点,对图像进行配准。图4为选择的
部分候选星点和三角形。

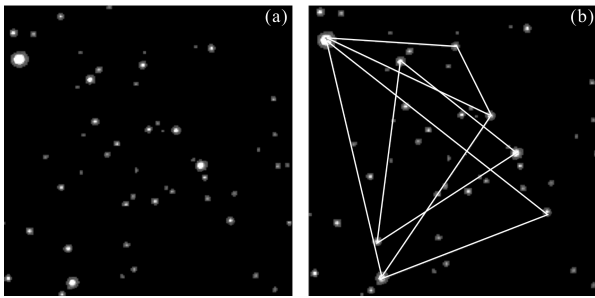


图4 部分候选三角形

Fig.4 Part of the triangle of candidates

2.3 确定图像运动参数进行配准

星空图像中,两帧图像间的变化较小,主要为平
移和旋转变化,得到两幅图像对应的3个星点的坐
标即可对图像进行六参数模型配准^[8-9],两幅图像
的关系可由下式表示:

$$\begin{cases} x_i' = a_{11}x_i + a_{12}y_i + a_{13} \\ y_i' = a_{21}x_i + a_{22}y_i + a_{23} \end{cases} = R[X, Y] + Q \quad i=1, 2, 3 \quad (5)$$

式中: (x, y) 为基准图像中像素坐标; (x', y') 为待配准
图像中像素位置。

将公式(5)展开,可得:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \\ x_3' \end{bmatrix} \quad (6)$$

由上式可知,共6个未知参数就可实现上述的
坐标变换。因此,通过将三角形匹配的3个顶点作
为三对已知位置数据恰能估计出坐标运动的参数。
假设三对顶点坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 和
 (x_1', y_1') 、 (x_2', y_2') 、 (x_3', y_3') 。

故有:

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \\ x_3' \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} y_1' \\ y_2' \\ y_3' \end{bmatrix} \quad (7)$$

由此可得到全局运动模型参数。

2.4 轨迹关联

由于观测图像较大,如单纯运用全局运动参数
对图像进行配准,需要对每个像素进行双线性插

值处理,计算量很大。且图像灰度值分布范围较广
(0~65 535),在插值时会使恒星像素误差较大,造成
在高亮恒星位置附近仍然存在高于背景的像素点,
对检测造成干扰。从前面的星图统计直方图可以得
出星点和目标占图像整体像素的不足3%,在2.2节
中,已经将星图中所有的星点和目标提取出来。在
这里仅对星点进行插值而忽略背景的影响。将星空
图像转化为只包含星点质心坐标矩阵的图像,其他像
素值置为0,对图像进行配准,这在很大程度上降低
了计算量提高了精确度。

对配准后的图像,通过帧插法^[10]或MTI^[11]算
法都可以有效的检测出运动的弱小目标。每两帧
图片中目标的运动轨迹较短,需要将多帧图像进
行关联组成目标的运动轨迹。对 N 帧图像进行配
准提取轨迹后,使用最近邻域滤波器,统计落入相
关域内的候选目标。由于帧间运动较小,在这里假
设目标保存匀速直线运动,若邻域滤波器中只有
一个目标则可用于轨迹更新,若有多个目标则根
据之前帧中目标的倾斜角 (β) 和距离 (h) 来判断,
剔除虚假目标。

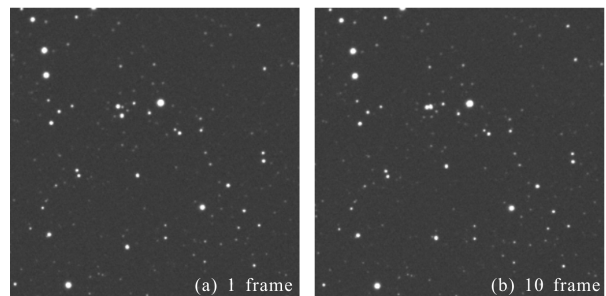
$$\beta_{i,i+1} = \arctan \frac{|y_{i+1} - y_i|}{|x_{i+1} - x_i|} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$h = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: (x, y) 为目标质心坐标; n 为序列帧数。

3 实验结果

为了验证文中算法,对星空序列图像进行试验,
图像大小为1 024 pixel×1 024 pixel,灰度级为16 bit,
图像背景均值为273.5,方差为12.3,对连续30帧图
像进行处理。图5为30帧测试图像中的4帧,图6(a)
为原图的局部放大图其中包含3个运动的小目标。
最优阈值的选取为 $T = \mu + 3\sigma$,图6(b)为去除背景后
的图像。



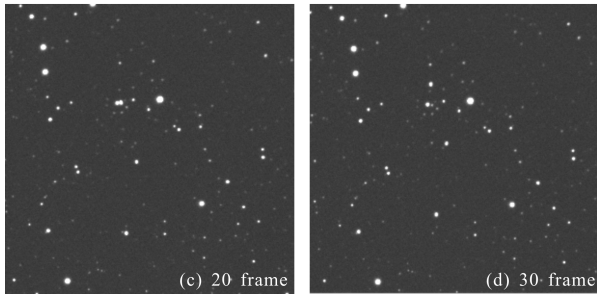


图 5 序列图像中的 4 帧

Fig.5 4 frames of image sequence

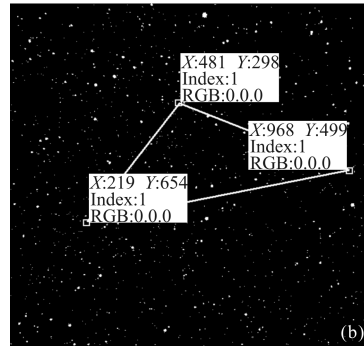


图 7 三角形配准图示

Fig.7 Triangle registration

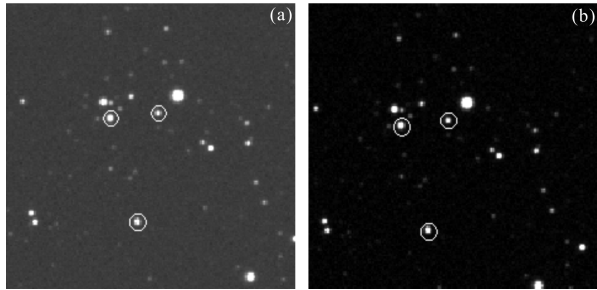


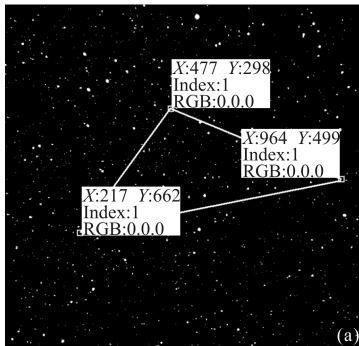
图 6 包含小目标的局部放大图

Fig.6 Partial enlarged image include small target

提取星图中星点面积大于 20 的亮点,整个星图中共提取亮点 852 个,并将对应的坐标、面积、像素和存入到数组 Star_region 中。取阈值 $K=100$,得到 $sum_region=31\ 040$,两帧图像中分别得到 32 个、33 个符合条件的星点。将这些候选星点按照灰度和降序排列,第一帧中组成的三角形三点坐标为(477.21, 298.30), (964.81, 499.24), (215.10, 652.94),对第二帧图像中的三角形进行遍历匹配,得到的配准三角形三点坐标为 (480.76, 298.32), (968.25, 499.28), (218.66, 653.02),如图 7 所示。

根据星点的坐标矩阵进行配准,得到的参数为:

$$R = \begin{pmatrix} 0.9997 & -0.0006 \\ 0.0003 & 1.0006 \end{pmatrix}, T = [3.9352, 0.1074]$$



星图配准后,使用最近邻滤波器进行多帧轨迹关联,图 8 为得到 20 帧图像的小目标运动轨迹图。

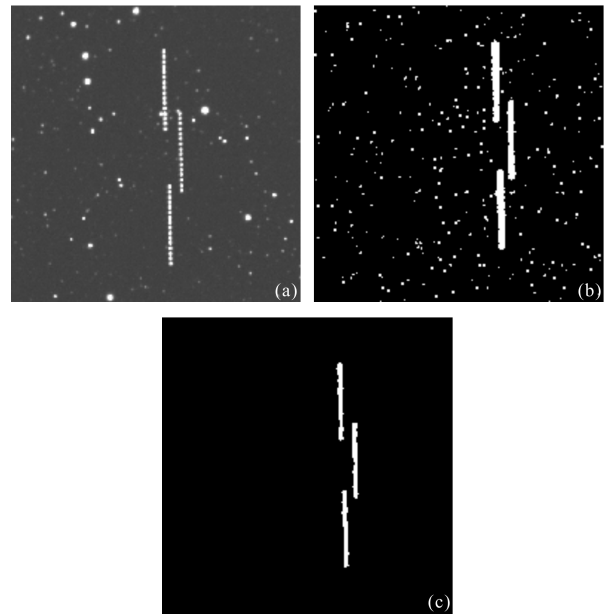


图 8 轨迹关联得到的运动目标轨迹

Fig.8 Small target trajectory after track association

算法耗时:分别对曝光时间为 300 ms, 700 ms, 1 100 ms, 1 600 ms, 四组不同的图像进行测试,检验算法的单帧处理时间,再利用 1 600 ms 曝光时间的图像,与其他算法进行对比,结果如表 1 所示。分析算法性能,Hough 变化法存在短线段被淹没、无端点信息的缺点,动态规划法由于光学散焦、目标入场出场的问题易引起目标的丢失。目前已有很多文献对这些方法进行了改进,在处理性能和算法耗时方面都有所提高。相比于传统三角形算法,文中算法的优点主要在于单帧构造三角形和相邻帧匹配上,通过合理的阈值选择可以有效减小构造的三角

形总数,是算法处理时间快慢的关键。

表 1 单帧图像处理时间

Tab.1 Processing time of single frame

Exposure time	Image frames	Total time/s	Frame time/s
300 ms	30	52.8	1.76
700 ms	30	55.1	1.84
1 100 ms	30	57.3	1.91
1 600 ms	30	62.4	2.08
Traditional triangle	30	122.5	4.08
Dynamic programming	30	86.7	2.89
Hough vary	30	78.1	2.60

算法灵敏度:文中所采用方法无须目标的先验知识,相比常规检测算法,如三维匹配滤波器,多级假设检验,动态规划等具有一定优势。从实验结果分析可得,检测的灵敏度主要依赖于星图质心定位和图像配准的精度,检测概率曲线如图 9 所示。

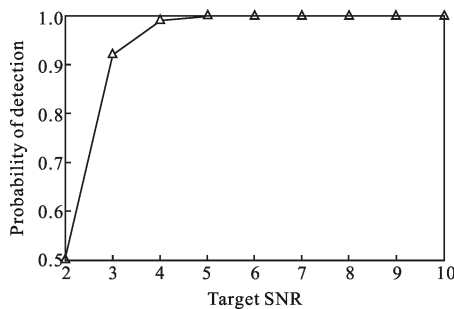


图 9 检测概率曲线

Fig.9 Probability curve of detection

为了验证文中算法的优越性,使用其他方法对文中采用的星图进行处理实验。分别采用 Hough 变换法,动态规划(DPA)算法和传统三角形算法与文中算法进行对比,如图 10 所示。在相同信噪比条件下,

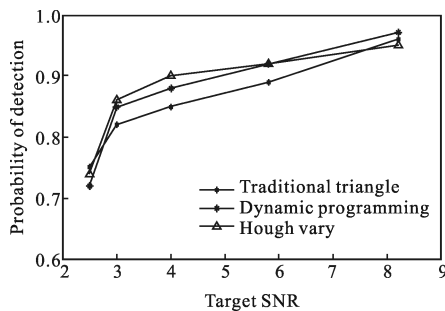


图 10 与其他方法对比

Fig.10 Contrast with other detection methods

比较算法的检测概率。在信噪比小于 3 时,各算法的虚警率都较高。图 9 中,当信噪比大于 4 时,文中算法检测概率在 0.97 以上,当信噪比达到 5 时,检测概率接近为 1,对比其他三种算法有较明显优势。在处理时间上,传统三角形算法由于要匹配的次数过多而浪费大量时间,单帧耗时均在 4 s 以上,文中通过对星点坐标的提取有效地降低了处理时间,较好的满足实时性的要求。

4 结论

文中在分析了深空背景图像模型的基础上,针对弱小目标的特点,提出了一种改进的基于三角形匹配的配准方法对弱小目标进行检测。通过最优阈值的选取去除背景干扰,在配准时忽略背景像素直接通过特征点之间的配准减小计算量。仿真实验表明文中改进的算法的实时性和灵敏度都能较好的满足要求。

参考文献:

- [1] Wang Zhaokui, Zhang Yulin. Algorithm for CCD star image rapid locating [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, 26(3): 209-214. (in Chinese)
王兆魁, 张育林. 一种 CCD 星图星点快速定位算法[J]. 空间科学学报, 2006, 26(3): 209-214.
- [2] Zhang T X, Meng L, Zuo Z R. Moving dim point target detection with three-dimensional wide-to-exact search directional filtering [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(2): 246-253.
- [3] Davey S J, Rutten M G, Cheung B. A comparison of detection performance for several Track-before-detect algorithms [C]//11th International Conference on Information Fusion, 2008: 1-8.
- [4] Wang Xuewei, Wang Chunxin, Zhang Yuye. Detection of small space target by dynamic programming [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 477-484. (in Chinese)
王学伟, 王春歆, 张玉叶, 等. 空间小目标动态规划检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 477-484.
- [5] Diani M, Corsini G, Baldacci A. Space-time processing for the detection of airborne targets in IR image sequences [J]. *IEEE Proc Vision Image Signal Proc*, 2001, 148(3): 151-157.
- [6] Luo Huan, Wang Fang, Chen Zhongqi. Infrared target detecting based on symmetrical displaced frame difference

- and optical flow estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1715–1720. (in Chinese)
- 罗寰, 王芳, 陈中起. 基于对称差分 and 光流估计的红外弱小目标检测[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1715–1720.
- [7] Jiang Lei, Zhang Yanning, Sun Jinqiu. Trajectory detection by non-uniform quantitative Hough transform in segmented blocks[J]. *Chinese Journal of Stereology and Mageanalysis*, 2009, 14(1): 60–66. (in Chinese)
- 姜磊, 张艳宁, 孙瑾秋. 基于分块的非均匀 Hough 变换轨迹检测方法[J]. 中国体视学与图像分析, 2009, 14(1): 60–66.
- [8] Hao Zhicheng, Zhu Ming. Serial image registration based on multiple restriction matching algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 702–708. (in Chinese)
- 郝志成, 朱明. 基于多约束准则匹配算法的序列图像配准[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 702–708.
- [9] Jae Hak Lee, Yong Sun Kim and atac. Robust CCD and IR image registration using gradient-based statistical information [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(4): 347–350.
- [10] Zhu Minghan, Luo Dayong. Moving objects detection and tracking based on two consecutive frames subtraction background model [J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, 14(8): 1004–1007. (in Chinese)
- 朱明早, 罗大庸. 基于帧间差分背景模型的运动物体检测与跟踪[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(8): 1004–1007.
- [11] Chu P L. Efficient Detection of small moving objects [R]. US: Lincoln Laboratory Technology Report ADA213314, 1989, 6: 1–77.