

基于最大值投影和快速配准的空间小目标检测

刘 峰¹, 奚晓梁¹, 沈同圣²

(1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001;

2. 中国国防科技信息中心, 北京 100142)

摘 要: 天基观测平台下弱小目标的检测是分析空间安全的重要研究内容。由于空间中存在大量外观与目标相似的恒星导致可利用空间分布信息缺乏; 观测平台的不规则性运动导致帧间成像差异, 都使得开发自动快速处理算法的难度增加。在分析星空图像模型的基础上, 提出了一种基于三角形匹配和最大值投影的小目标检测方法。首先通过特征三角形对序列图像进行配准, 并采用星点坐标矩阵的方法减小计算量。然后针对序列帧所有图像, 采用最大值投影变换的方法, 检测运动的小目标。最后通过 200 帧观测图像对算法进行验证, 实验表明该方法能实时、准确地对目标进行检测, 同时可以精确地定位目标质心。

关键词: 天基观测; 目标检测; 三角形匹配; 最大值投影

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1104002

Space small targets detection based on maximum projection and quick registration

Liu Feng¹, Xi Xiaoliang¹, Shen Tongsheng²

(1. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. National Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100142, China)

Abstract: It is an important research content for analysis of space security to detect the small targets with space-based observation platform. But it's difficult to develop a fast, robust and automatically processing algorithm for some reasons: there are too many stars which have similar appearance with targets in space image and the observation platform moves irregularly. Based on analyzing star image model, a method of space target detection was proposed by triangle matching and maximum projection. First step is the sequence images registration with feature triangle and for reducing computation, the star centroid coordinate matrix was calculated. Then the maximum projection transformation for image sequences was used for detecting the moving small targets. Finally, simulation and test demonstrate the method can achieve real time and accurate targets detection with 200 sequence images.

Key words: space-based observation; target detection; triangle matching; maximum projection

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(51005242); 国家 863 计划

作者简介: 刘峰(1988-), 男, 博士, 主要从事图像处理、目标检测、识别方面的研究。Email: Liufeng_cv@126.com

0 引言

天基空间目标监视系统是将探测设备直接安装在卫星上从而实现对其他空间目标的探测和跟踪,其优点在于不受地理位置和气象条件限制,探测效果好;缺点是造价高,星上信息处理能力有限。然而,相对已有的地基空间目标监视系统,天基空间目标监视系统势必成为未来进行空间目标探测和跟踪的重要发展方向。空间目标观测系统任务是利用各种手段对空间目标进行观测、识别和跟踪,以便掌握空间目标态势。

1 相关工作

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。同时天基平台的高速运动和宇宙射线造成的噪声,也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研究热点问题^[1]。

针对弱小目标检测问题,国内外学者已研究了多种方法。常用的有滤波法^[2],多级假设检验方法^[3],小波分析法^[4],动态规划法^[5],基于稀疏表示的方法^[6]等。由于深空背景的图像大多涉及军事应用,公开发表的文献较少,目前较好的方法有,参考文献[7]中利用配准帧差的方法检测空间小目标,首先利用图像块移位相关匹配算法对相邻帧配准,通过差分方法检测星空图像中的小目标。该方法的问题是只能校准平移背景,不能用于旋转背景,配准精度也较低。参考文献[8]提出基于构建星点间部最小距离特征的配准算法,该方法采用递归搜索的方法构建特征,为空间目标图像相邻帧配准提供了新的思路。但是该方法计算量大,而且对噪声过于敏感。参考文献[9]提出了一种基于分块非均匀 Hough 变换的轨迹检测方法,通过变换检测直线对轨迹进行提取。参考文献[10]提出一种运动星空背景下的基于时空域相结合的弱小运动目标检测算法,在空域上采用形态学 Tophat 滤波降低噪声增强目标,在时域上利用运动背景补偿和多帧差分滤波增强目标的运动特

性,完成目标检测。但是此类方法对观测平台复杂运动下的检测跟踪以及目标链的确定等问题未作描述。

针对运动平台下的小目标检测问题,文中提出一种基于三角形匹配和最大值投影变换的小目标检测算法。利用仿射变换模型,提取星点坐标矩阵并通过三角形匹配进行配准,由于避免了对整幅图像的操作,该方法可以有效降低算法的计算量;检测阶段采用最大值投影变换的方式,同时对序列帧的所有图像进行操作,消除背景噪声,保留运动目标信息,该方法可以提高运动小目标检测的准确率。

2 算法介绍

星空背景下小目标检测算法需要准确、快速地对运动目标进行提取,文中提出的算法有效地解决了这两个难题。2.1 节中利用三角形匹配的方法对不同帧图像进行配准,该方法采用提取星点坐标矩阵的方法避免对整幅图像进行操作,省略了配准过程中的图像重采样步骤,节约大量的运算时间。

在配准后的图像中,2.2 节采用最大值投影变换的方法,充分利用了连续帧中运动目标的相关性,在检测目标的同时滤除背景噪声,提高算法准确性。在第 4 节中利用仿真实验,验证了文中算法的有效性和准确性。

2.1 三角形匹配及图像配准

由于平台和目标的相对运动,要想准确的提取运动目标的轨迹和坐标,需要对序列帧图像进行配准,文中采用仿射变换模型,利用空间三角形匹配的方法,提取星点坐标矩阵达到准确快速配准的目的。在星图识别领域中,由于图像传感器的频谱响应特性的差异,单一的星点亮度常被认为是一种不可靠的信息量。而星间角距可以通过观测星图准确地计算出来,在很小的门限范围内,其变化可以忽略不计,是一种可靠的特征量。文中首先采用星点亮度和星点面积作为星点之间的匹配特征,再利用三角形的星间角距得到相邻帧的准确运动参数。首先在连续帧中分割出高亮星点,为了减小计算量,只选取少数的高亮度星点计算质心,将每帧中任意 3 个星点组成一个三角形,计算 3 点的不变矩。以在相邻 3 帧中不变矩相等(或变化很小)为条件,寻找第一组满足条件的三角形,为了增加可靠性,还需要排除那些 3 点共线和边长过短的三角形。步骤如下:

步骤 1: 提取三角形质心构建三角形数据库, 以同一帧中的任意 3 个星点构成三角形, 排除那些共线和边长过短的三角形, 计算不变矩。由于不变矩与计算顺序无关, 因此不需要对相邻帧中的 3 个恒星一一对应;

步骤 2: 匹配识别, 从全部三角形中, 第一组满足在相邻 3 帧中不变矩相等 (变化很小) 的三角形; 将这个三角形的 3 个顶点作为参考恒星。

步骤 3: 计算运动参数, 通过仿射变换模型, 计算相邻帧之间的平移量和旋转量。

相邻两帧图像的三角形星点选择如图 1 所示, 其中, A 为待检测目标, a, b, c, d 为恒星, 任意选取其中 3 颗, 一共可以组成 4 个不同的三角形, 按照上述选取步骤, 最终选取以 a, b, c 为顶点的三角形作为待配准点。

星空图像中, 两帧图像间的变化较小, 主要为平移和旋转变换, 得到两幅图像对应的 3 个星点的坐

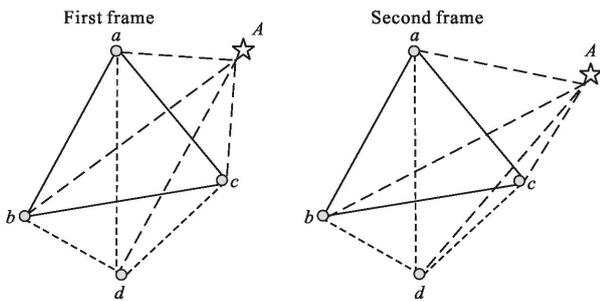


图 1 相邻帧中恒星和目标星之间距离变化示意图

Fig.1 Distance changing of stars and targets in adjacent frame

标即可对图像进行 6 参数模型配准^[8-9], 两幅图像的关系可由下式表示:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \rho \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x+x_0 \\ y+y_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: (x, y) 为基准图像中像素坐标; x_0 和 y_0 分别为 x 和 y 方向上的未知平移。 (x', y') 为待配准图像中像素位置。 ρ 为比例因子, $\rho=1$ 时, 仿射变换变为刚体变换, θ 为未知的旋转角。显然求出 ρ, θ 和 (x_0, y_0) , 就可以利用上式进行配准。将上式展开, 令:

$$\begin{cases} a_{11} = \rho \cdot \cos \theta, a_{12} = \rho \cdot \sin \theta \\ a_{13} = a_{11} \cdot x_0 + a_{12} \cdot y_0, a_{21} = -a_{12} \\ a_{22} = a_{11}, a_{23} = a_{11} \cdot y_0 - a_{12} \cdot x_0 \end{cases} \quad (2)$$

只要估计出几何参数 $a_{j,k}, j=1, 2, 3, k=1, 2, 3$, 便可利用公式(2)实现坐标变换。因为仿射变换有 6 个位置参数, 至少需要 3 个对应特征点的 3 对星点坐

标值。因而可得:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \\ x_3' \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1' \\ y_2' \\ y_3' \end{pmatrix} \quad (4)$$

通过 3 对星点坐标 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 和 $(x_1', y_1'), (x_2', y_2'), (x_3', y_3')$ 得到共 6 个参数, 由此可得全局运动模型参数。如图 2 所示, 图像中的亮点为候选星点, 连线组成三角形的 3 个顶点为选定星点。

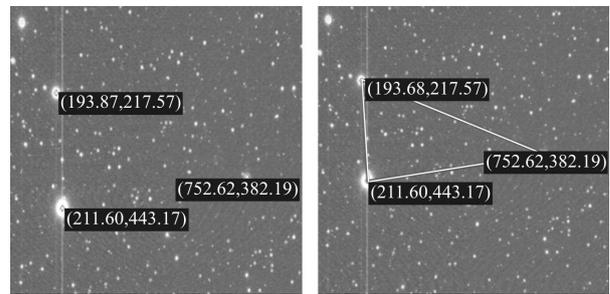


图 2 三角形匹配的图像配准

Fig.2 Image registration of triangle matching

2.2 星图序列投影

配准后的序列帧图像, 采用基于最大值投影变换的运动目标检测方法。首先将第一帧到最后帧图像数据对应像素取最大值构成一帧新图像, 形成一个最大帧, 投影的帧数也可根据实际需要选择; 再对序列帧图像对应像素求平均值和估计标准差; 将以上的处理结果生成一帧新图, 新图中与运动目标对应的轨迹得以保存, 而不运动的物体被排除或被大幅抑制。算法流程图如图 3 所示。

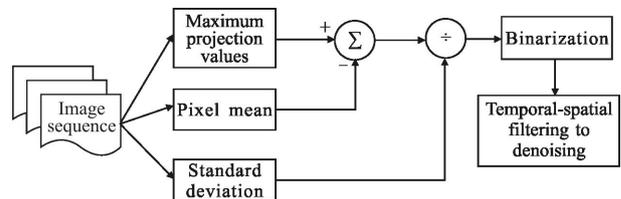


图 3 算法流程图

Fig.3 Algorithm flow chart

(1) 帧序列最大值投影 提取所有帧图像对应位置的灰度最大值, 将这个最大值投影到一幅新的图像 $z(x)$ 上:

$$z(x) \approx \max\{r'(x, t), t=1, \dots, N\} \quad (5)$$

式中： $r'(x, t)$ 表示在位置 x 处，采样中所有待检测运动信号噪声，包括电流引入的高斯噪声，背景光照引入的泊松分布噪声、恒星及其他目标的运动噪声等。 N 为投影总帧数。此处将各帧图像投影近似作为采样集合的最大值投影。

为了进一步减少数据处理的计算量，最大值投影后采用一个固定阈值进行图像二值化。为满足需求，最大值需要将均值去掉并除以该点的标准差估计。

(2) 帧序列第二大值投影 同最大值投影类似，将连续多帧序列图像对应位置灰度排序，取第二大值组成一幅新的图像 $z_2(x)$ ：

$$z_2(x) = \max_second\{r'(x, t), t=1, \dots, N\} \quad (6)$$

(3) 为了得到均值的估计值，用所有帧的像素和减去对应像素的最大值，这个最大值有可能是待检测目标。这就导致了均值的估计值略低于均值的真值：

$$\hat{mean}(x) = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{t=1}^N r'(x, t) - z(x) \right) \quad (7)$$

当 $N=2$ 时，公式(7)中给定位置均值的估计是两个值中的最小值。

(4) 最大值减帧均值：

$$z'(x) = z(x) - \hat{mean}(x) \quad (8)$$

(5) 估计标准差。首先通过下式得到标准差：

$$\hat{stdv}_1 = \sqrt{\hat{mean}(x) / \alpha + \sigma^2 / \alpha^2} \quad (9)$$

然后再计算标准差：

$$\hat{stdv}_2 = 0.5(\max^2[r'(x, t), t=1, \dots, N] - \min[\hat{mean}(x-1), \hat{mean}(x), \hat{mean}(x+1)]) \quad (10)$$

式中： \hat{stdv}_1 为假定背景符合泊松分布(背景光和暗电流噪声)加高斯分布(电流噪声)模型。公式(10)对 \hat{stdv}_2 的求解是一种实验性的方法，对静止目标比较敏感。 \hat{stdv}_1 对均匀背景具有非常好的检测性能，但如果只使用该方法来估计标准差，无法正确估计静止目标的标准差，将会产生大量虚警，而只使用 \hat{stdv}_2 则无法得到均匀背景杂波的标准差估计。

(6) 归一化处理 比较两个标准差的值，如果 \hat{stdv}_2 大于 $2\hat{stdv}_1$ ，则取 \hat{stdv}_2 作为标准差：

$$z''(x) = z'(x) / \hat{stdv}_2 \quad (11)$$

否则取 \hat{stdv}_1 ：

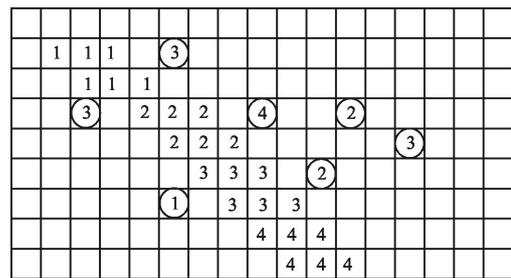
$$z''(x) = z'(x) / \hat{stdv}_1 \quad (12)$$

2.3 运动轨迹检测

经过二值化后的图像中仍包含有少量的孤立噪声，通过连通域的统计和二维匹配滤波器可直接在二值图像 $f(x, y)$ 中消除噪声并检测目标的运动轨迹。

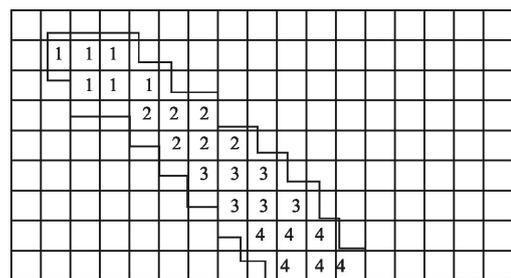
图像的运动轨迹是由各帧的最大值投影而得到的，并将轨迹中二值化为“1”的各像素点标记其源于哪一帧，如图 4 所示。数字 1、2、3、4 表示该点所属的时间帧。从示意图中可以看出，画圈的 1、2、3、4 是孤立的噪声点，如果不剔除，将影响定轨精度。为此，设计一个时空域滤波器，在计算空间域连通区域大小的同时，考虑时间帧的信息，从而滤除孤立的噪声点。具体步骤如下：

(1) 遍历二值化为“1”的点，得到每个像素点的时间帧标记；(2) 计算相同时间帧的 8 连通区域，形成运动轨迹；(3) 利用滑动窗滤波的方法，剔除小于某个阈值的连通区域。



(a) 孤立噪声点

(a) Isolation noise point



(b) 连通域滤波结果

(b) Result after connected area filter

图 4 孤立噪声点去除

Fig.4 Elimination of the isolated noise points

3 实验结果

3.1 实验仿真

选取 200 帧序列图像进行运动目标的轨迹提取

来验证文中算法,图像灰像素度级为 16 位,图像大小为 1 024 pixel×1 024 pixel。首先需要对图像进行预处理,利用高斯拟合的方法得到图像均值 μ 和方差 σ ,利用阈值 $T_{\min}=\mu-3\sigma, T_{\max}=\mu+3\sigma$ 对原始图像进行背景滤除,如图 5 所示。图 6 中亮点表示提取的候选

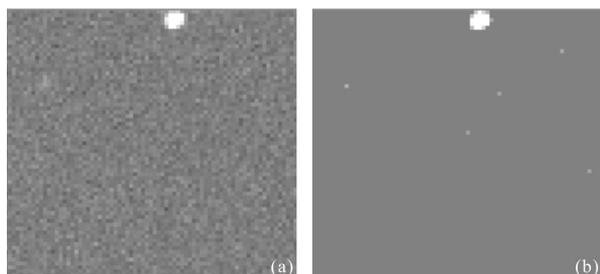


图 5 背景滤除示意图

Fig.5 Diagram of background removal

星点,图 6(a)中标注坐标的星点为匹配三角形的 3 个顶点,图 6(b)中坐标为(599.23, 206.32, 42)和(305.33, 668.88, 5)的星点为检测得到的移动小目标,坐标中的 4 和 5 表示序列图像中检测到的目标排序。图 7 为 200 帧图像中检测出 11 个运动目标,通过检测的先后顺序,自动对目标进行编号,并提取其坐标、速度、大小等相关信息,如表 1 所示。

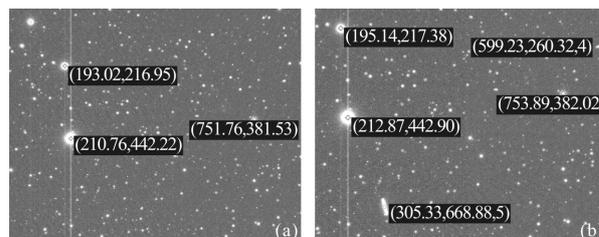


图 6 候选星点和待匹配星点示意图

Fig.6 Diagram of candidate and matching star

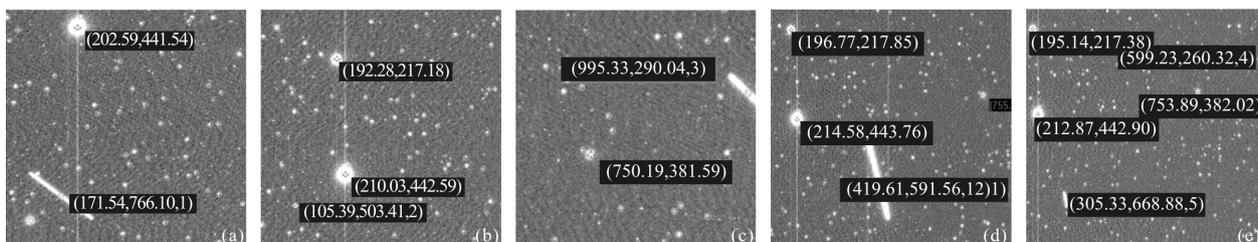


图 7 目标检测结果

Fig.7 Result of target detection

表 1 目标的相关信息

Tab.1 Relevant information of targets

| Image frames | Number of targets | X-coordinate | Y-coordinate | Speed | Direction | Target size | Average value | SNR |
|--------------|-------------------|--------------|--------------|--------|-----------|-------------|---------------|-------|
| 90 | 5 | 347.32 | 832.82 | 169.22 | 104.46 | 682 | 395.19 | 29.04 |
| 91 | 5 | 305.33 | 668.87 | 169.22 | 104.46 | 678 | 404.47 | 29364 |
| 92 | 5 | 262.91 | 503.09 | 171.15 | 104.42 | 633 | 434.38 | 31.81 |
| 93 | 5 | 220.01 | 335.48 | 173.02 | 104.41 | 695 | 404.69 | 29.55 |
| 172 | 6 | 99.61 | 177.67 | 17.75 | 105.13 | 96 | 294.50 | 21.72 |
| 173 | 6 | 95.07 | 160.44 | 17.73 | 104.96 | 102 | 277.68 | 20.47 |
| 174 | 6 | 90.52 | 143.21 | 17.79 | 104.89 | 110 | 260.78 | 19.30 |
| 175 | 6 | 85.91 | 125.92 | 17.79 | 104.85 | 102 | 270.95 | 20.00 |

3.2 算法分析

表 2 列出了处理序列图像的耗时情况,对相同序列图像分别截取前 50 帧、100 帧、150 帧和 200 帧,单帧耗时在 0.4 s 左右,随着处理图像帧数的增多,

单帧耗时情况没有增加反而逐渐缩短。其原因是在利用最大值投影变换对小目标进行检测时,算法直接对所有帧图像进行统一处理,因此耗时情况略微减少。

表 2 单帧图像处理时间

Tab.2 Processing time of single frame

| Image frames | Times/s | Time of single frame/s | Detection result |
|--------------|---------|------------------------|------------------|
| 50 | 21.62 | 0.432 | 4 |
| 100 | 42.70 | 0.427 | 4 |
| 150 | 62.25 | 0.415 | 10 |
| 200 | 80.45 | 0.402 | 11 |

文中所采用的算法无需目标的先验知识，相比常规检测算法具有一定的优势。但在文中所讨论的星图检测中，从实验结果分析来看，检测的灵敏度主要依赖于预处理的结果，弱小目标的分割决定了检测灵敏度，背景抑制的结果决定了虚警率。在信噪比低于 3 时，检测性能下降很快，目标分割概率小于 50%，如图 8 所示，过低的分割概率容易导致无法完成航迹关联。

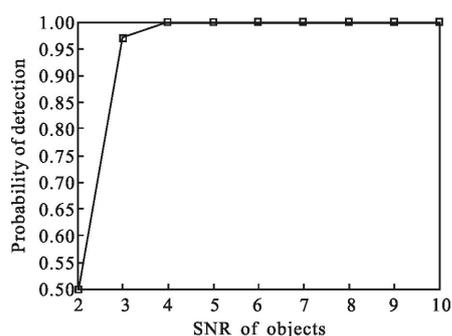


图 8 检测概率曲线

Fig.8 Curve of detection probability

4 结论

针对天基监视系统检测运动小目标的需求，在保证准确性的同时提高实时性，文中提出了基于三角形匹配和最大值投影变换的小目标检测方法。利用三角形星点坐标矩阵进行图像间的配准减小算法计算量，利用最大值投影检测的方法，可有效消除背景噪声对检测运动小目标的干扰，有效提高检测准确率，对于文中算法存在的问题和适用条件，在对图像进行配准时，需要有足够多的候选三角形，且配准

点距离边缘需要保持一定距离。在对目标进行检测跟踪时，目标快速的进出场也会对检测的精度和准确性造成影响。

参考文献：

- [1] Yang Shuqiang, Cui Qi, Li Biao. Spacial small target detection based on optical temporal profile characteriscs[J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17 (6): 36-39. (in Chinese)
- [2] Pan Jingchang. Research on automated processing and target detection of astronomical information [D]. Jinan: Shandong University, 2011. (in Chinese)
- [3] Chu P L. Efficient detection of small moving objects [R]. 1989: 3-44.
- [4] Chen Binwen, Wang Wenwei, Qin Qianqing. Infrared dim target detection based on Fuzzy-ART neural network [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 857-863. (in Chinese)
- [5] Han Yanli, Liu Feng. Small targets detection algorithm based on triangle match space[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3134-3140. (in Chinese)
- [6] Zhao Jiayi, Tang Zhengyuan, Yang Jie, et al. Infrared small target detection based on image sparse representation [J]. *Journal of Infrared & Milimeter Waves*, 2011, 30 (2): 18-156.
- [7] Li Zhenwei, Zhang Tao, Sun Mingguo. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 589-599. (in Chinese)
- [8] Qi Changsong, Liu Enhai, Zhong Jianyong. Discussion on space-based deep space small moving target detecion [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(5): 28-32. (in Chinese)
- [9] Yu Qiang, Huang Shucai, Zhao Wei, et al. A fusion detection algorithm of small infrared target based on spatical-temporal accumulative difference [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(6): 181-184. (in Chinese)
- [10] Jiang Lei, Zhang Yanning, Sun Jinqiu. Trajectory detection by non-uniform quantitative Hough Transform in segmented blocks [J]. *Chinese Journal of Stereology and Mage Analysis*, 2009, 14(1): 60-66. (in Chinese)