文章编号 1004-924X(2017)07-1954-07

基于距离矩阵的星图运动目标检测

王 敏[1,2],赵金宇[1*],陈 涛[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)
(2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了克服传统星图空间运动目标检测方法对星图帧间图像亮度、帧间配准以及成像模式等具有敏感度较高的缺点,利用星点间拓扑结构稳定的特性,提出了基于距离矩阵的星图运动目标检测方法。该方法首先对各帧星图独立检测目标,然后构建星点的距离矩阵,并与相邻帧星图的距离矩阵作减法,则得到运动目标对应的距离变化较大的一些列(行),利用这个性质完成运动目标的检测。由于距离矩阵与星图成像条件无关,只受运动目标的影响,因此该方法对星图帧间图像亮度、观测平台抖动、帧间失配以及成像模式等具有鲁棒性。仿真试验和真实数据试验表明,该方法在帧间失配等情况下,仍然能够从背景恒星中有效地识别空间运动目标。与传统方法比较,本文方法具有更低的虚警率。

关 键 词:星图;运动目标检测;距离矩阵;拓扑结构;鲁棒性
中图分类号:TP391.4;P123.46 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20172507.1954

Moving target detection in star map based on distance matrix

WANG Min[1,2], ZHAO Jin-yu[1*], CHEN Tao[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
(2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to overcome defects with higher sensibility of moving target detection method for traditional star map space on image brightness among star map frames, frame-to-frame registration, imaging mode and others, taking advantages of the stable feature of the topological structure among star points, a moving target detection method in the star map based on the distance matrix was proposed. The method was used to independently detect targets of all frames of star map; then, it was used to establish the distance matrix of star points and to subtract the distance matrix for consecutive frame of the star map; the corresponding distance of moving target varied greatly; taking advantages of the property, the detection on the moving target was completed. As the distance matrix was irrelevant to the imaging condition of the star map but was influenced by the moving target, thus the method had robustness on image brightness among star map frames, shaking of the observation platform, inter-frame mismatch, imaging mode and others. The simulation experiment and the

收稿日期:2016-10-19;**修订日期**:2016-12-19.
基金项目:国家 863 高科技研究发展计划资助项目(No. 2011AAXXX2035);中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 065X32CN60)

truthful data experiment show that the method can be used to effectively identify spatially moving targets in background fixed stars under the condition of inter-frame mismatch. Comparing with the tradition method, the method in the thesis has lower false alarm rate.

Key words: star map; moving target detection; distance matrix; topological structure; robustness

1　引　言

空间监视系统是进行空间控制不可或缺的一种重要手段，其主要基于地基观测方式实现，多采用地基光学望远镜、雷达探测器及无线电信号探测器组成的监视网来对空间目标进行探测和跟踪。空间监视系统的主要监视目标（空间目标）主要是指卫星，也包括各种空间碎片[1]，如进入空间轨道的助推火箭、保护罩和其它物体，还包括进入地球外层空间的各种宇宙飞行物，如彗星和小行星。空间目标检测[2]是根据拍摄到的序列星图对空间目标进行搜索定位的过程，是空间信息应用研究的重要方向，是空间态势感知的重要组成部分，也是确保载人航天安全的重要技术保障。

在恒星数量巨大的背景里准确地对空间点目标进行检测和跟踪是空间探测领域的难题之一。由于目标和背景恒星的点目标成像特性，难以利用目标的灰度特征、区域特征、形状、颜色以及纹理等视觉特征来区分目标和背景恒星，因此传统的目标检测和跟踪算法并不适用于星图目标检测。星图目标检测与跟踪的核心问题是如何从恒星背景中提取出空间目标。空间目标和背景恒星的成像特征相似，主要区别特征是空间目标是运动的，恒星目标是静止的，为了对目标的运动轨迹进行有效的提取，必须利用多帧图像信息。

目前国内外具有代表性的空间目标检测算法包括：背景差分法、光流分割法、先跟踪后检测法和帧间差分法等。背景差分法[3-5]是利用图像序列中的当前帧和背景参考模型比较来检测运动物体的一种方法，其性能依赖于所使用的背景建模技术，同时对动态场景的变化非常敏感，由于星空背景的复杂性、不可预知性以及各种环境干扰和噪声的存在，该方法鲁棒性较差；光流法[6-9]基本思想是赋予图像中的每一个像素点一个速度矢量，从而形成了该图像的运动场，通过判断光流矢量在整个图像区域是否连续变化来检测运动目标，但是该方法计算复杂度较高，受噪声的影响较大，多适用于目标运动速度不大、图像噪声比较小以及对实时性要求比较低的情况；先跟踪后检测方法[10-13]不对单帧图像中有无目标进行判断，而是对图像中大量候选目标轨迹同时进行跟踪，然后根据制定的多帧图像检测判据来排除虚假轨迹，维持真实轨迹；帧间差分法[14-16]是一种通过对图像序列中相邻两帧作差分运算来提取运动目标的方法，优点是算法实现简单、计算复杂度低和对光线等场景变化不敏感，缺点是处理效果高度依赖于选择的帧间时间间隔，此外该方法需要对参与差分的两帧图像严格配准。

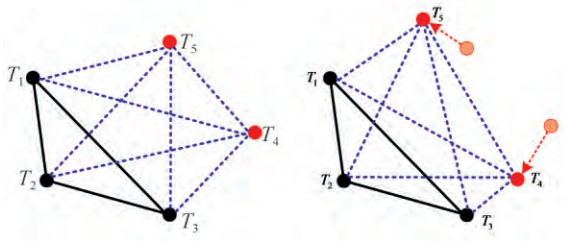
上述这些方法都可以归结为利用多帧序列图像进行星图目标检测，这些方法在图像空域信息的基础上，利用时域信息（序列图像）对目标运动信息进行提取。时域信息的使用能够有效地提取目标的运动信息，但同时也对处理方法和使用范围带来了约束。在处理方法上，由于需要使用时间维度的信息，需要对序列图像进行严格配准，否则时域信息就无法提取，星图图像因其本身的特点，配准难度较大。在使用范围上，地基平台有两种工作模式：凝视模式和恒星模式。凝视模式下，望远镜跟随卫星运动，在星图中表现为卫星为点，恒星为条状；在恒星模式下，望远镜与恒星背景保持相对静止，在星图中表现为恒星为点状，卫星为条状，因此需要不同的处理方法针对特定的工作模式处理。

本文提出一种基于星点间距离矩阵的运动目标检测方法，该方法建立在以下基础上：视场中的星点受传感器平台姿态抖动、帧间失配等原因在图像中位置发生变化，但星点之间的相对几何结构保持不变，只有空间目标的运动才会造成星点几何结构的变化。因此利用星点几何结构信息进行运动目标检测可以使星图照度变化、探测器噪声和探测器姿态变化具有鲁棒性，同时适用于不同的观测模式。星点结构信息的变化直接反映了运动目标的信息，对星图运动目标检测具有重要意义。

2　基于距离矩阵的星图运动目标检测方法

假定有两帧星图 I_1 和 I_2，传统利用时域信息的分析方法需要对两帧图像进行帧间配准，同时需要知道图像的获取模式，针对不同模式采用不同的处理方法。本文提出的基于星点间距离矩阵的方法不需要对图像进行配准，同时适用于多种成像模式获得的图像，具体方法如下。

不失一般性，令 $T_1,T_2,\cdots,T_5$ 分别指代图像中的五个目标，其中 T_1,T_2,T_3 为背景恒星，T_4，T_5 为空间目标。观测平台采取不同观测模式或观测平台姿态变化会导致目标在星图中的绝对位置发生变化，但由于恒星间具有稳定的相对位置关系，观测模式的选取、观测平台姿态的变换并不会影响星间几何结构。如图 1(a)所示，图中 T_1，T_2,T_3 为恒星，具有稳定的几何位置关系，T_4,T_5 为空间目标，由于自身的运动改变了星间几何结构。T_1,T_2,T_3 之间的构成的空间结构具有极强



(a)第一帧图像　(b)第二帧图像

(a) First frame　(b) Second frame

图 1　星间几何结构示意图

Fig. 1　Geometric structure of stars

由于恒星间距离不变，因此两帧距离的变换为 0，也即可以得到如下特征描述向量。

$$\begin{cases} f_1=[0,0,0,\Delta d_{41},\Delta d_{51}] \\ f_2=[0,0,0,\Delta d_{42},\Delta d_{52}] \\ f_3=[0,0,0,\Delta d_{43},\Delta d_{53}] \\ f_4=[\Delta d_{41},\Delta d_{42},\Delta d_{43},0,\Delta d_{45}] \\ f_5=[\Delta d_{51},\Delta d_{52},\Delta d_{53},\Delta d_{54},0] \end{cases}. \tag{3}$$

的稳定性(图中用实线表示)，不会随着观测条件的改变而变化；而恒星与空间目标之间以及空间目标之间(图中用虚线表示)的位置关系仅受空间目标运动的影响，与观测条件无关。

从以上分析可以看出，星间的几何结构信息可以反映出空间目标的运动状态，同时对观测条件、帧间配准等问题具有鲁棒性。本文利用距离矩阵描述星间的几何结构。对上例而言，距离矩阵 $\boldsymbol{D}$ 可按如下方式构造。

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & d_{45} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

其中 d_{ij} 为 T_i 和 T_j 的欧式距离。已知距离矩阵 D 为对称矩阵，其对角线元素为 0，其余元素为正。从式(1)中可以看出距离矩阵 $\boldsymbol{D}$ 的每一列(或行)相当于对应的星点与其他星点之间的距离，具有很强的识别性和特异性，因此 $\boldsymbol{D}$ 的列可以视为星点的特征描述向量，按上例五个星点情形，令 $\boldsymbol{f}_i=[d_{1i},d_{2i},\cdots,d_{5i}]^{\mathrm{T}}$，则 $\boldsymbol{f}_i$ 构成了对星点 T_i 的特征描述。

为了对运动空间目标分析和检测，需要利用多帧图像信息。为表示方便，$\boldsymbol{D}(k)$ 表示第 k 帧图像的距离矩阵，$T_i^{(k)}$ 表示第 k 帧图像中的第 i 个星点。由于距离矩阵 $\boldsymbol{D}$ 只受运动目标的影响，因此不同帧之间的距离矩阵可以在不进行帧间配准的情况下运算。以图 1 为例分析距离矩阵在帧间变化的特点。

将前后帧图像的距离矩阵相减可得：

$$\boldsymbol{D}^{(2)}-\boldsymbol{D}^{(1)}=\begin{bmatrix} d_{11}^{(2)}-d_{11}^{(1)} & d_{12}^{(2)}-d_{12}^{(1)} & \cdots & d_{15}^{(2)}-d_{15}^{(1)} \\ d_{21}^{(2)}-d_{21}^{(1)} & d_{22}^{(2)}-d_{22}^{(1)} & \cdots & d_{25}^{(2)}-d_{25}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{51}^{(2)}-d_{51}^{(1)} & d_{52}^{(2)}-d_{52}^{(1)} & \cdots & d_{55}^{(2)}-d_{55}^{(1)} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

从式(3)中可以看出，对运动目标而言，其对应的描述向量非零元素较多，一般仅一个元素为 0，说明其距离信息变化较大；恒星目标对应的描述向量具有较多的零元素，距离信息变化较小。对于一般星图而言，背景恒星的数量远大于空间目标数量，这时对星点描述向量存在以下规律：

$$\| f_{\text{目标}} \| >> \| f_{\text{恒星}} \|, \tag{4}$$

其中 $\|\cdot\|$ 为向量二范数运算符。利用式(4)可有效地从恒星背景中检测运动目标，同时算法具有较强的鲁棒性。

综上，基于距离矩阵的星图运动目标检测方法步骤如下：

(1)按式(1)对两帧图像分别计算距离矩阵；

(2)按式(2)计算距离矩阵的差值

(3)按式(3)计算各目标对应的特征描述向量；

(4)按式(4)计算描述向量的模，并设定阈值进行目标分割。

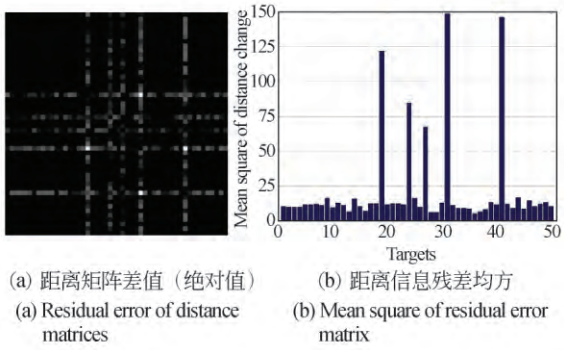
利用多帧星图图像中的相邻帧之间进行运动目标检测，可以得到运动目标的轨迹，实现运动目标的跟踪。需要说明的是，计算星点之间的距离信息需要对星点精确定位，本文采用灰度值加权方法[17]计算星点的质心坐标。

3　试验结果

3.1　仿真试验

本节针对基于距离矩阵的运动目标检测方法进行仿真试验验证。仿真试验参数如下：星图大小为 512×512 像素，星点总目标为 50 个，运动空间目标随机分配 5 个，目标大小在 2×2 到 7×7 之间随机分配，目标运动方向在 $[0,2\pi]$ 间随机分配，目标单次运动步长在 [2,5] 之间随机分配。仿真得到的前后帧图像分别如图 2(a)和(b)所示。每帧图包含 50 个星点，其中 5 个为运动空间目标，其余为背景恒星。

按式(1)分别对两帧图像中各个星点计算距离矩阵，得到两个 50×50 大小的矩阵，按照前文所述的方法相减，得到距离的变化信息，如图 3(a)所示。从图 3 中可以看出，距离变化矩阵中有 5 列(行)对应的变化较大，而其余的列变化信息不明显，验证了本文第二节的理论分析。事实上，由于空间目标本身的运动，同时背景恒星数目远大于空间目标，因此空间目标对应的列具有较高的“亮度”，而背景恒星则变化量较小。



(a) 距离矩阵差值（绝对值）　(b) 距离信息残差均方

(a) Residual error of distance matrices　(b) Mean square of residual error matrix

图 3　星点距离矩阵变化信息

Fig. 3　Change information of distance matrix for stars

按式(3)取距离差值矩阵每一列作为对应星点的特征描述向量，计算特征描述向量的二范数(等同于对应星点距离变化的均方)，各星点距离信息变化均方值如图 3(b)所示。从图 3 中可以看出，有 5 个星点对应的距离信息变化均方值远大于其他星点，从前文理论分析可知，这 5 个星点对应着 5 个运动空间目标。这个试验验证了式(4)的结论，即空间目标对应的距离变化值远大于恒星对应的距离变化值，给利用距离矩阵进行运动目标检测奠定了基础。

一般星图中，背景恒星的数量远大于空间目标数量，空间目标对应的星点的距离变化均方值($\|f_{目标}\|$)会远大于背景恒星。为了通过距离变化信息实现背景恒星和空间目标的分割，本文对距离变化信息进行排序，并通过确定曲线拐点完成阈值的自动确定，如图 4(a)所示。图中可以看出该曲线在“恒星阶段”比较平稳，在恒星与空间目标转换处曲线陡然上升，即可确定该点为曲线拐点。具有比拐点值大的距离变化均方的星点即确定为空间目标。通过拐点识别方法检测的空间目标如图 4(b)所示。需要说明的是本文提到的“拐点”是指曲线变化率最大的点，而非传统的“二阶导数为 0”的拐点。

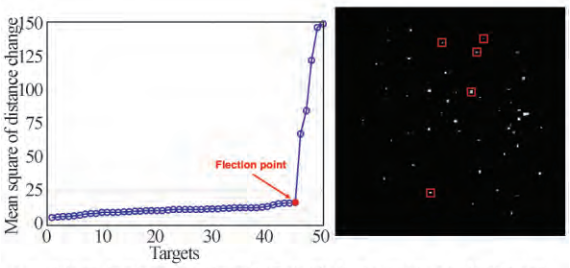


(a)前帧图像　(b)后帧图像

(a) First frame　(b) Second frame

图 2　仿真星图

Fig. 2　Simulated star maps



(a) 对各星点距离变化均方值排序并计算拐点，从而实现运动目标的检测　(b) 运动目标检测结果

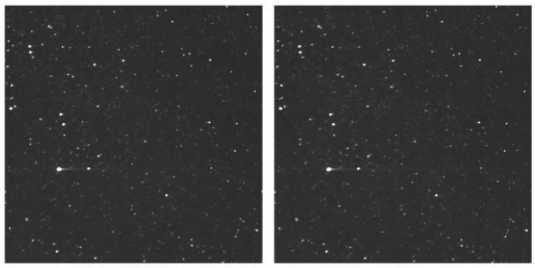
(a) Sort mean square values of distance change and compute the inflection point, then detect the moving targets based on inflection point　(b) Final moving target detection result

图 4　利用本文方法对运动目标检测

Fig. 4　Target detection result of method proposed in this paper

3.2　真实星图试验

本文所使用的是中国科学院 600 mm 口径的大视场(4.8°)光学望远镜作为实验拍摄仪器，软件平台为 matlab2010，硬件配置为 Intel 双核 2.4G CPU，1G 内存。天文定位计算机选用 P4 3.0 CPU 的便携式工控机。在拍摄星图前，对设备进行了简单的调平与寻北。实验中采用恒星模式的拍摄方式对星空成像，选择晴朗夜晚拍摄的星图，该 CCD 图像大小为 512×512，共 60 帧，帧间时间间隔为 5 s。本文以其中两帧图像的数据处理结果为例，经去噪预处理后的两帧图像分别如图 5(a)和 5(b)所示。由于平台抖动等原因，两帧图像没有严格配准，有轻微平移(约 1.2 pixel)。



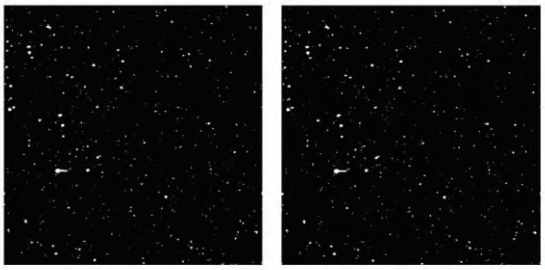
(a)前一帧图像　(b)后一帧图像

(a) First frame　(b) Second frame

图 5　试验使用的原始数据

Fig. 5　Raw data used in experiment

本文使用改进中值率波算法[18]以及目标质心计算方法[19]得到了如图 6 所示的目标检测结果，共检测到目标 317 个。如何从目标检测结果中得到运动目标信息是本文研究的关键。由于两幅图像没有严格配准，若利用传统时域分析方法(如帧间差分法)进行处理则需要对两幅图像配准，这样一方面配准精度受到限制；另一方面，对目标检测结果要求极高(需要两幅图像检测结果高度一致)。



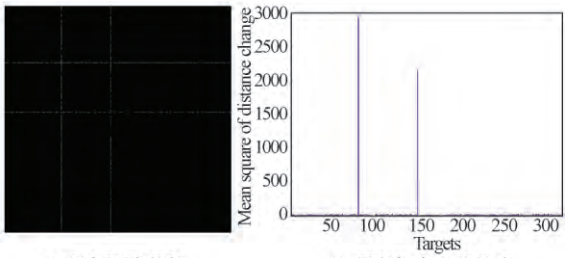
(a) 前一帧图像目标检测结果　(b) 后一帧图像目标检测结果

(a) First frame　(b) Second frame

图 6　目标检测结果

Fig. 6　Target detection result

本文利用前文所述的距离矩阵方法进行分析：对两帧图像的目标分别计算距离矩阵，然后两个距离矩阵相减，得到 317 个目标的两帧图像距离矩阵变化信息如图 7 所示。



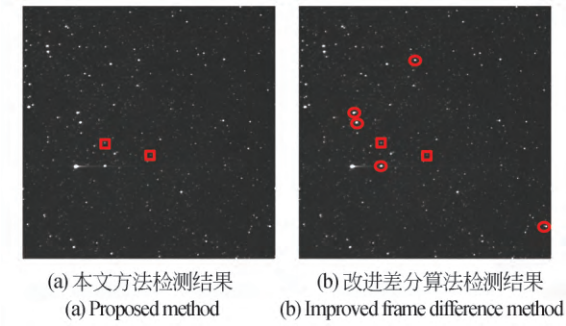
(a) 距离矩阵差值　(b) 距离信息变化均方

(a) Residual error of distance matrices and　(b) Mean square of residual error matrix

图 7　距离信息变化结果

Fig. 7　Change information of distance matrix for stars

从图 7 中可以看出，有两个星点的距离信息变化远远大于其余星点的距离信息变化，根据前文分析，这两个星点为空间目标，由于自身的运动，导致与其他星点距离信息发生变化，具有较大的距离信息变化；而背景恒星数量较多且恒星之间距离信息不变，因而前后两帧图像距离信息变化较少。根据距离信息的变化，目标检测结果如图 8(a)所示，红框内为运动目标，椭圆内为虚警(彩图见期刊电子版)。作为对比，利用改进帧间



(a) 本文方法检测结果 (a) Proposed method　　(b) 改进差分算法检测结果 (b) Improved frame difference method

图 8　星图目标检测最终结果

Fig. 8　Target detection result

差分算法[16]进行动目标提取，得到的结果如图 8(b)所示。

从图 8 中可以看出，本文方法能够有效检测运动目标，而改进差分算法由于帧间失配导致有一定数量的虚警。结合仿真数据图 3(b)以及真实数据图 7(b)可以看出，恒星数量相比运动目标数量越多，则本文方法效果越明显。

值得注意的是，本文方法计算复杂度与目标数量的二次方成正比，因此当目标数量较多时，该方法可能具有较大的计算复杂度。对本数据而言，共有 317 个目标，其计算时间为约为 2.8 ms。可以估计，对 3 000 个目标情况时，计算时间约为 280 ms。一般情况下，星图目标数目从几十到几百不等，极少情况下，会有超过 1 000 个目标，因此本方法效率可以满足实际需要。

4　结　论

本文提出了基于星点间几何结构的空间目标检测方法，该方法利用星点间的距离信息，对连续帧星图的亮度变化、观测平台姿态抖动、帧间失配以及观测模式等问题具有高度鲁棒特性，同时可适用于多种模式观测的数据。仿真试验和真实数据试验表明，本文方法能够有效地在大量恒星背景中实现空间目标的准确识别。但本文方法实现背景恒星和空间目标分割需要距离变化的阈值，该阈值在背景恒星数量较多时容易确定。尽管一般情况下，星图中背景恒星数量远大于空间目标，如何在背景恒星数量较少时自动确定分割阈值是需要进一步研究的问题。

参考文献：

[1] 孙荣煜，赵长印. GEO 空间碎片的光学观测与精密定位[J]. 天文学进展，2012，30(3)：394-410.
SUN R Y，ZHAO CH Y. Optical survey technique for space debris in GEO [J]. *Progress in Astronomy*，2012，30(3)：394-410. (in Chinese)

[2] 李振伟，张涛，张楠，等. 暗弱空间目标的高精度定位[J]. 光学 精密工程，2015，23(9)：2627-2634.
LI ZH W，ZHANG T，ZHANG N，*et al*.. High precision orientation of faint space objects [J]. *Opt. Precision Eng.*，2015，23(9)：2627-2634. (in Chinese)

[3] 孙挺，齐迎春，耿国华. 基于帧间差分和背景差分的运动目标检测算法[J]. 吉林大学学报(工学版)，2016，46(4)：1325-1329.
SUN T，QI Y C，GENG G H. Moving object detection algorithm based on frame difference and background subtraction [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*，2016，46(4)：1325-1329. (in Chinese)

[4] 赵东，赵宏伟，于繁华. 动态多目标优化的运动物体图像分割[J]. 光学 精密工程，2015，23(7)：2109-2116.
ZHAO D，ZHAO H W，YU F H. Moving object image segmentation by dynamic multi-objective optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*，2015，23(7)：2109-2116. (in Chinese)

[5] 柯卫，王宏力，袁宇，等. 基于区域生长法的星图中星提取方法[J]. 火力与指挥控制，2015，40(12)：67-69.
KE W，WANG H L，YUAN Y，*et al*.. Method of star extraction from star image [J]. *Fire Control & Comm Control*，2015，40(12)：67-69. (in Chinese)

[6] 赖丽君，徐智勇，张栩铣. 应用于稳像系统中的改进梯度光流法[J]. 红外与激光工程，2016，45(4)：273-279.
LAI L J，XU ZH Y，ZHANG X Y. Improved gradient optical flow for digital image stabilization [J]. *Infrared and Laser Engineering*，2016，45(4)：273-279. (in Chinese)

[7] SENST T，EISELEIN V，EVANGELIO RH，*et al*.. Robust modified L^2 local optical flow estimation and feature tracking [C]. *IEEE Workshop on Application of Computer Vision*，IEEE，2011：685-690.

[8] 肖军，朱世鹏，黄杭，等. 基于光流法的运动目标

检测与跟踪算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 770-774.
XIAO J, ZHU SH P, HUANG H, *et al*.. Object detecting and tracking algorithm based on optical flow [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(6): 770-774. (in Chinese)

[9] 刘洪彬, 常发亮. 权重系数自适应光流法运动目标检测[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(2): 460-468.
LIU H B, CHANG F L. Moving object detection by optical flow method based on adaptive weight coefficient [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 460-468. (in Chinese)

[10] 李淼, 龙云利, 李骏, 等. 采用多伯努利滤波器的过采样点目标检测前跟踪[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(12): 3446-3455.
LI M, LONG Y L, LI J, *et al*.. Oversampling point target track-before-detect by Multi-Bernoulli filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3446-3455. (in Chinese)

[11] 李翠芸, 姬红兵. Rao-Blackwellized 粒子滤波的红外多个弱目标检测前跟踪[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(9): 2342-2349.
LI C Y, JI H B. Track-beforedetection for multi weak targets based on Rao-Blackwellized particle filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2342-2349. (in Chinese)

[12] 郭云飞, 赵尚宇. 幅值关联动态规划检测前跟踪算法[J]. 光电工程, 2016, 43(5): 70-76.
GUO Y F, ZHAO S Y. An amplitude association dynamic programming track before detect algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(5): 70-76. (in Chinese)

[13] ZHENG D K, WANG SH Y, QIN X. A dynamic programming track-before-detect algorithm based on local linearization for non-Gaussian clutter background [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2016, 25(3): 583-590.

[14] 林培杰, 郑柏春, 陈志聪, 等. 面向多区域视频监控的运动目标检测系统[J]. 液晶与显示, 2015, 30(3): 484-491.
LIN P J, ZHENG B C, CHEN ZH C, *et al*.. System of multi-regions moving object detection in video surveillance [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(3): 484-491. (in Chinese)

[15] 张健, 娄树理, 任建存. 基于时序多帧投影的空间目标检测算法[J]. 激光与红外, 2015, 45(1): 88-93.
ZHANG J, LOU SH L, REN J C. Space target detection algorithm based on sequential multi-frames projection [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(1): 88-93. (in Chinese)

[16] 王恩旺, 王恩达. 改进的帧差法在空间运动目标检测中的应用[J]. 天文研究与技术, 2016, 13(3): 333-339.
WANG E W, WANG E D. Application of an improved frame difference method in space moving target detection [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2016, 13(3): 333-339. (in Chinese)

[17] 雷蕾, 李言俊, 张科. 图像目标质心快速搜索算法[J]. 红外技术, 2009, 29(9): 548-551.
LEI L, LI Y J, ZHANG K. A fast algorithm for searching object centrids in binary images [J]. *Infrared Technology*, 2009, 29(9): 548-551. (in Chinese)

[18] 杨卓东, 张欣, 张涛, 等. 改进自适应中值滤波的图像去噪[J]. 通信技术, 2015, 48(11): 1257-1260.
YANG ZH D, ZHANG X, ZHANG T, *et al*.. Image noiseremoval on modified adaptive median Filter [J]. *Communications Technology*, 2009, 29(9): 548-551. (in Chinese)

[19] 程利群, 王晓曼, 景文博. 利用标记分水岭法实现夏克哈特曼波前传感器质心探测[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(6): 1494-1499.
CHEN L Q, WANG X M, JING W B. Centroid detection of Shack-Hartmann wave-front sensor by marked watershed method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1494-1499. (in Chinese)

作者简介:



王　敏(1989－),女,山东枣庄人,博士研究生,2012 年于吉林大学获得学士学位,2012 年至今于中国科学院大学长春光学精密仪器与物理研究所硕博连读,研究方向为复杂背景下的空间目标自动识别及图像处理。E-mail: wmin0805@163.com

导师简介:



赵金宇(1976－),男,内蒙通辽人,博士,研究员,研究生导师,2006 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事地基空间目标探测设备软件设备,图像处理和电控总体工作。E-mail: zhaojy@ ciomp.ac.cn.