

一种面向弱小目标检测的序列星图配准算法

张春华^{1), 2)} 周晓中¹⁾ 王学伟²⁾ 周晓东²⁾

¹⁾(中国人民解放军 61741 部队信息中心, 北京 100081) ²⁾(海军航空工程学院控制工程系, 烟台 264001)

摘要 对于星空观测 CCD 相机获得的序列图像, 由于相机姿态的变化使得图像存在全局运动, 空间目标的运动与背景恒星的运动混淆在一起, 增加了空间目标检测的难度, 为了有效地对空间弱小目标进行检测, 提出了一种序列星图配准算法。首先, 对图像进行预处理, 包括成像传输通道不同导致的辐射不均匀性校正和空间杂散光辐射校正; 然后, 利用序列图像一一对应的高亮恒星星像质心作为特征点计算全局运动参数; 最后, 提出了一种基于星像质心坐标矩阵的星图配准算法, 将星图转换为星像质心坐标矩阵的形式, 利用全局运动参数对星像质心坐标矩阵进行处理, 进行星图配准, 同时对背景恒星进行滤除。算法能够有效地克服恒星和杂散光的干扰, 而且在配准过程中将对星图的处理转化为对星像坐标矩阵的处理, 省略了配准过程中的图像重采样与变换步骤, 节约大量的运算时间, 配准后的图像在对恒星背景进行滤除的同时, 在一定程度上降低了弱小目标检测的难度。

关键词 星图 图像配准 特征点提取 特征点匹配

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)03-435-08

Research of Star-sky Image Registration Method for Dim Target Detection

ZHANG Chunhua¹⁾, ZHOU Xiaozhong²⁾, WANG Xuwei³⁾, ZHOU Xiaodong⁴⁾

¹⁾(The 61741th Unit of PLA, Beijing 100081)

²⁾(Department of Control Engineering, Navy Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001)

Abstract For the CCD serial star images, while the space target is moving, the background is still moving because the CCD flat is moving. The global movement of background stars and the local movement of the space target both exist in the star-sky images, which add difficulty to dim target detection. In order to detect dim space target with high efficiency, a star-sky image registration algorithm is put forward. First is the pretreatment, including radiation asymmetry rectification and stray-light rectification. Then, for each frame of image, centroids of the brightest stars are computed. The stars which can radiate in every frame are used as control points to compute the global motion parameters. Finally, the star-sky image is transformed into a form of star centroid coordinate matrix. And the background stars can be eliminated by using the global motion parameters. The algorithm omits its image resampling and transformation steps, and thus saves abundant of computing time. The registration image can eliminate the background stars and the dim target can be easily detected from the registration images.

Keywords star-sky image, image registration, feature points extraction, feature points match

0 引言

对于星空观测 CCD 相机拍摄的序列图像, 空间

目标运动的同时, 相机姿态的变化使得序列图像存在全局运动, 目标在图像中的运动与背景 (包括恒星和深空背景) 的运动混淆在一起, 增加了目标检测的复杂度。此时, 目标检测可以分成两个部分: 对

收稿日期: 2008-08-14 改回日期: 2009-01-22

第一作者简介: 张春华 (1980—), 女, 工程师。现为航空工程学院信号与信息处理专业博士研究生。主要研究方向为图像处理, 运动估计等。E-mail: xiaohua800506@163.com

图像背景进行配准和静止背景下运动目标的检测。本文重点研究序列星图配准算法, 从而对背景进行滤除, 使空间目标暴露出来。

图像配准的目的是达到两个图像的内容在拓扑上的对应和几何上的对齐^[1], 即建立两幅图像内容的对应关系并使相对应的内容在位置上对齐。一个典型的图像配准系统包括 4 个部分^[2]: 1) 特征检测; 2) 特征匹配; 3) 变换模型参数估算; 4) 图像重采样与变换。传统的图像配准方法通常可以分为两大类: 基于像素灰度的方法和基于特征的方法。前者利用图像本身的灰度信息来度量图像的相似程度, 其中基于互信息^[3-4]的配准方法精度较高, 而且对图像不完整和存在噪声的情况不敏感, 主要特点是实现简单, 但是计算量较大, 在实际应用中受到限制。后者首先要对待配准图像进行特征提取, 再利用提取到的特征完成两幅图像特征之间的匹配, 通过特征的匹配关系建立图像之间的映射变换, 算法的关键是提取图像中共有的特征点或结构, 诸如边缘点^[5]、角点^[6]、兴趣点^[7]、轮廓^[8]等。

针对序列星图成像的特点, 提出了一种面向弱小目标检测的星图配准算法。算法首先利用序列图像中一一对应的高亮恒星质心作为特征点, 计算全局运动参数; 在星图配准的过程中, 为了降低待处理的数据量, 将星图转换为星像质心坐标矩阵的形式, 并引入形态学变换, 利用全局运动参数对星像质心坐标矩阵进行处理, 对星图进行配准, 同时对背景恒星进行滤除。由于背景恒星的运动参数是一致的, 而目标与背景的运动参数通常不同, 因此, 配准后的图像在对恒星背景进行滤除后, 能够较容易地检测到弱小目标。

1 星图预处理

星空观测 CCD 图像主要包括恒星、空间目标、深空背景噪声以及空间辐射噪声等。恒星是 CCD 成像的重要组成部分, 在图像上表现为大量近似对称高斯分布的点状目标。空间目标成像在图像上表现为微弱的点状小目标。深空背景噪声主要包括深空背景噪声或进入相机的杂散光。空间辐射噪声是由于外层空间的高能粒子打到 CCD 焦平面上, 使一个或几个像素内的信号瞬时增强, 其信号通常仅持续一个图像帧。星空观测图像可以描述为

$$I(x, y) = S(x, y) + B(x, y) + N(x, y) \quad (1)$$

式中, (x, y) 为像素点的坐标, $I(x, y)$ 为观测相机获取的观测图像, $S(x, y)$ 为目标图像, 包括恒星和空间目标图像, $B(x, y)$ 为星空背景图像, $N(x, y)$ 为噪声图像, 包括空间辐射噪声、CCD 固定点噪声等。

图 1 为某天文台拍摄的星图 (16 bit 灰度图, $1\,024 \times 1\,024$ pixel), 空间目标用 ‘□’ 标记出。图像背景均值 1 739.4 标准差 15.3 图像灰度显示范围为 1 693~1 861。

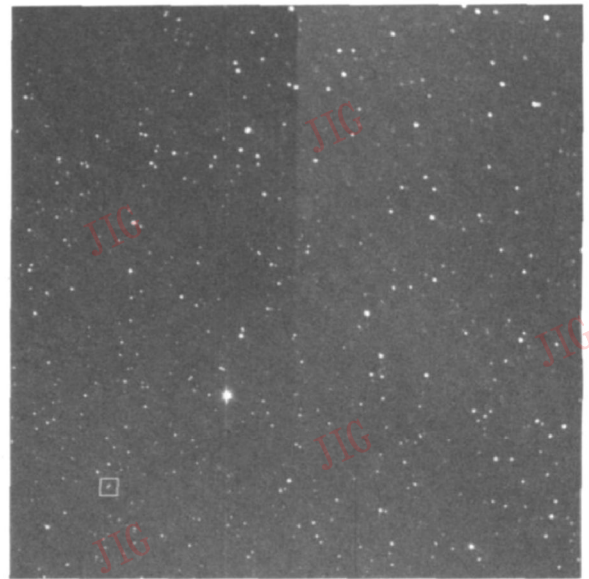


图 1 星空观测图像

Fig. 1 Star-sky observation image

对于原始星图, 由于相机成像过程传输通道的不同, 导致中线两侧图像灰度级不同。另外, 由于相机和天体 (太阳、月亮、地球等) 的相对运动, 在很多情况下目标观测方向上有天体杂散光进入。

需要说明的是: 由于上述原因导致的星图不均匀性不会影响到序列星图特征点的提取, 但是在后续对星图背景进行滤除的过程中, 会在很大程度上影响背景滤除的效果, 增加弱小目标检测的复杂度, 可能付出巨大的计算量也难以检测到真实目标, 因此, 图像预处理主要围绕上述两项问题展开。

1.1 成像传输通道不同导致的辐射不均匀性校正

星图辐射校正的主要任务是精确的估计图像背景的统计特性, 利用背景星图中线两侧的统计参数对星图实现辐射校正。由于星图中存在大量的恒星和少量其他点状噪声, 利用所有像素点计算出来的均值和方差并不是背景均值和方差的最优估计。在对星图处理算法的研究中, 提出了一种基于局部直方图 Gauss 拟合的背景参数估计方法^[9], 能够成功

地避免恒星和其他点状噪声的干扰,准确估计星图背景的统计参数。

分别对图像 I 的左半部分 I_L 和右半部分 I_R 求其背景的统计特性,得到 $I_L \sim N(\mu_L, \sigma_L)$, $I_R \sim N(\mu_R, \sigma_R)$, 然后利用下式对图像进行校正:

$$I_L = \frac{I_L - \mu_L}{\sigma_L} \sigma_R + \mu_R \quad (2)$$

对图 1 进行相对辐射校正,不均匀性得到消除,中线两侧图像均值相等,如图 2 所示,校正后图像背景的统计特性为 $I \sim N(\mu, \sigma)$, 其中, $\mu = \mu_R$, $\sigma = \sigma_R$ 。

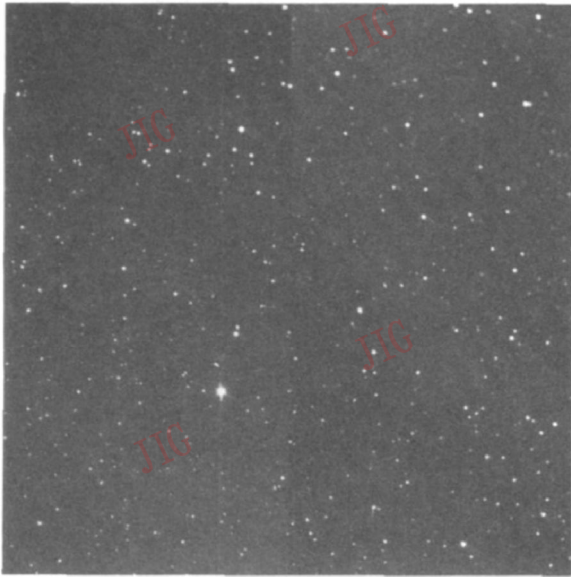


图 2 辐射不均匀性校正
Fig. 2 Radiation correct

1.2 空间杂散光辐射校正

空间观测星图容易受到天体杂散光的影响,由于相机对空间目标观测时尽量会避开杂散光的干扰,再者,相机本身的构造对杂散光能够起到一定的抑制作用,所以杂散光对图像的均匀性影响较小,但是由于本文星图配准的目的是提取空间弱小目标,通过对实际观测数据的处理发现,轻微的杂散光也在较大的程度上影响目标提取的准确性和提取速度,因此对杂散光进行校正是不可缺少的。

取 $T_1 = \mu - SVR_B \cdot \sigma$, $T_2 = \mu + SVR_B \cdot \sigma$, 根据正态分布原理,理论上 $SVR_B = 3$ 时按照下式计算得到的 $B(x, y)$ 可以包括 99.7% 的背景噪声。

$$B(x, y) = \begin{cases} I(x, y) & I(x, y) \in [T_1, T_2] \\ \mu & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

对 $B(x, y)$ 利用同态滤波^[10]算法能够较好地去除杂散光的干扰,结果如图 3 所示。

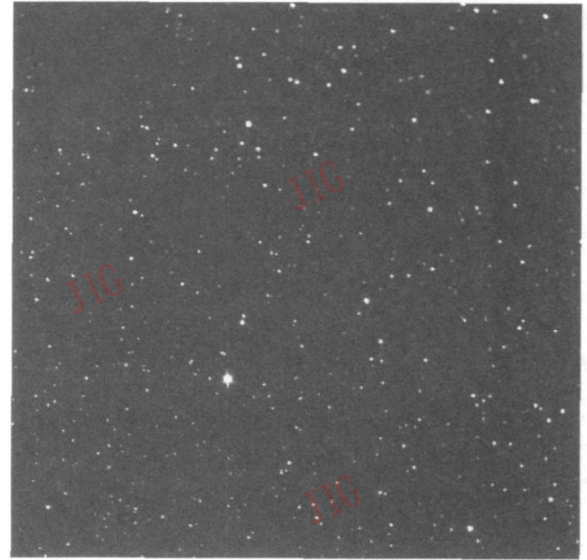


图 3 杂散光校正
Fig. 3 Stray-light correct

2 序列星图配准

2.1 星图特征点检测^[11]

特征点是进行图像配准的基础,特征点抽取质量的好坏将直接影响到配准的精度和效率。按照文献[12]给出的评价标准,好的特征点应当满足以下条件:1)重复度高:抽取出的两幅图内的特征点具有高的一致性与稳定性;2)包含的信息量大:也就是说被抽取的点很突出,能够有效地反映物体形状的主要结构信息。

通过第 1 节的分析可知,星空观测图像不存在明显的如边缘、轮廓等特征信息。对于星图中比较亮的星,峰值大大高于噪声平均值,区域周围的像元亮度逐渐变暗,接近噪声平均值,比较暗的星则基本被噪声淹没,这种星信号峰值低,所占像元少,难以精确计算出中心坐标,针对恒星成像质心相对稳定的特点,本文选取恒星的质心作为特征点。

在天文学上习惯用等效视星等值来表示天体的亮度,星等值越小,星体越亮,星等每降低一等,亮度增加为前一星等的 2.51 倍。本文选取星图中最亮的 M_0 个星等对恒星进行提取,设 0 等星对应的像素灰度值为 I_0 , 对于第 $k(k = 1, 2, \dots, K)$ 帧图像,取图像中灰度值最大的像素 I_{max} , 根据普森公式,利用下式计算像素灰度值对应的星等 M_{max} :

$$M_{max} - M_0 = -2.51 \lg \frac{I_{max} - \mu}{I_0 - \mu} \quad (4)$$

其中, $M_0 = 0$ 星等值为 $M_{min} = M_{max} + M_0$ 的星对应的

像素灰度值 $I_{m_{in}}$ 可以通过下式计算得到:

$$M_{m_{in}} - M_0 = -2.51 \cdot \log_{10} \frac{I_{m_{in}} - \mu}{I_0 - \mu} \quad (5)$$

定义 1 对图像 I 进行阈值分解, 称 $B(I, t)$ 为阈值水平 t 上的二值化图像, $B(I, t)$ 通过下述公式得到:

$$B(I, t) = \begin{cases} 1 & I(x, y) \geq t \\ 0 & I(x, y) < t \end{cases} \quad (6)$$

称 $G(I, t)$ 为阈值水平 t 上的灰度图像:

$$G(I, t) = \begin{cases} I(x, y) & I(x, y) \geq t \\ 0 & I(x, y) < t \end{cases} \quad (7)$$

星图特征点检测具体步骤如下:

1) 对第 k 帧图像 $I(x, y)$, 首先求得最亮的像素值 $I_{m_{ax}}$, 通过式 (4)、式 (5) 求出的星等值为 $M_{m_{in}} = M_{m_{ax}} + M_v$ 的星对应的灰度值 $I_{m_{in}}$ 。

M_v 的大小决定了待提取特征恒星点的数量, 通常根据所选用的变换模型通过调整 M_v 来控制特征点的数量。对于同一相机的星图, 取相同的 M_v 会得到近似相同数量的特征点。对于本文所采用的星图, 取 $M_v = 3$ 便可取得较好的效果, 即 $I_{m_{in}}$ 为 $M_v = 3$ 时利用式 (4) 式 (5) 计算得到的像素值。

2) 对图像 $I(x, y)$ 取阈值水平为 $I_{m_{in}}$ 的灰度图像 $GryI(x, y)$, 即最亮的 M_v 个星等的恒星图像。

$$GryI(x, y) = \begin{cases} I(x, y) & I(x, y) \geq I_{m_{in}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

3) 对 $GryI(x, y)$ 利用交叉投影方法^[13] 提取恒星星像区域 $AreaStar_i$ ($i = 1, 2, \dots$), 根据星像区域原点矩计算区域质心 (px_i, py_i) , 同时根据式 (9) 得到高亮恒星星等 M_i :

$$M_i - M_{m_{ax}} = -2.51 \log_{10} \frac{\max_{(x, y) \in AreaStar_i} (I(x, y) - \mu)}{I_{m_{ax}} - \mu} \quad (9)$$

其中, $\max_{(x, y) \in AreaStar_i} I(x, y)$ 为图像 $I(x, y)$ 中星像区域 $AreaStar_i$ 的最大像素值。第 k 帧图像高亮恒星特征点的质心坐标 $PosStar_k$ 和星等值 $MagStar_k$ 分别为

$$PosStar_k \Big|_{2 \times N_k} = \begin{bmatrix} px_1, px_2, \dots, px_{N_k} \\ py_1, py_2, \dots, py_{N_k} \end{bmatrix}$$

$$MagStar_k \Big|_{1 \times N_k} = (M_1, M_2, \dots, M_{N_k})$$

式中, N_k 为第 k 帧图像高亮恒星星像的个数。

2.2 星图特征点匹配

由于特征提取技术本身的复杂性、噪声的干扰以及星图自身运动的影响, 常常发生特征点位置偏

移、丢失某些特征点或出现虚假特征点等失真, 导致实际星图配准过程的主要难点如下:

1) 如果使用不属于主运动的独立运动物体 (如空间目标、高能粒子噪声等) 进行匹配会导致变换模型参数计算错误;

2) 由于运动造成的高亮恒星进场或出场的影响导致特征点集不稳定, 造成图像配准不正确。

通过 2.1 节求得的高亮恒星特征点在序列图像中并不是一一对应的, 因此需要对序列图像的特征点进行匹配。特征点匹配主要围绕两种思路展开: 一种是图像特征点间的相关运算, 另一种是围绕寻找一一对应的特征点展开。由于星图中恒星成像的特征相似, 均为高斯点状, 所以通过相关运算很难实现星图中恒星特征点的准确配准。本文星图配准的工作主要是围绕剔除虚假特征点, 寻找一一对应的恒星点展开。

序列星图的观测通常是在很短的时间间隔内连续拍摄一系列图像, 因此, 序列图像间的运动速度通常较小, 可以通过文献 [14] 的方法结合实际观测模式估计得到序列图像相邻帧间的最大运动位移 V , 假设序列图像的帧数为 K , 根据特征点运动的连续性和亮度相对稳定的性质, 利用特征点搜索-匹配算法剔除噪声点和存在进场/出场现象的高亮恒星, 得到一一对应的高亮恒星点。

1) 初始化: 设 $k = 1$ 。

2) 对于序列图像的第 k 帧, 记 $PosStar_k$ 中坐标为 (px_j, py_j) 的点为初始点 $P_j^k (px_j, py_j)$ 。其中, j 表示第 k 帧图像高亮恒星编号, $1 \leq j \leq N_k$ 。

3) 运动轨迹搜索: 在 $PosStar_{k+1}$ 中, 以 P_j^{k+1} 为圆心, 寻找满足下述条件的点:

条件 1 与 P_j^k 距离小于 V ; ($1 \leq k \leq K - 1$)

条件 2 两者对应星像的星等差小于 0.1, 即两星像的亮度相差不超过两者之中较亮星像亮度的 10%; ($1 \leq k \leq K - 1$)

条件 3 两点连线角度与 α_j^{k-1} 相差小于 15° , α_j^{k-1} 为 P_j^{k-1} 与 P_j^k 连线的方向。 ($2 \leq k \leq K - 1$)

记录满足条件的点集 $Q (q_1, q_2, \dots, q_{N_D})$, 其中, N_D 为 $PosStar_{k+1}$ 中与星点 P_j^k 对应的满足条件的点的个数。

4) 特征点匹配

如果 $N_D = 0$ 则认为 P_j^k 为高亮噪声点, 删除点 P_j^k ;

如果 $N_D = 1$, 则认为 P_j^k 为前 k 帧图像中运动连

续的高亮恒星,记录该点与 P_j^k 连线的方向 α_j^k ;

如果 $N_D > 1$ 在点集 Q 中寻找与 P_j^k 亮度最接近的点,并记录该点与 P_j^k 连线的方向 α_j^k 。由于高亮恒星星像数量少,且在图像中比较分散,极少数情况下会出现 $N_D > 1$ 现象,但是由于高能粒子的影响,不排除 $N_D > 1$ 的可能性。

5) 经过步骤 3)、步骤 4) 已经对 $PosStar_k$ 中的部分特征点进行了删除,得到了在相邻两帧图像中满足运动轨迹的连续性和亮度相对稳定的星像,为了表述的方便,将通过步骤 3)、步骤 4) 以后得到的星像仍记为 $PosStar_k$ 和 $PosStar_{k+1}$, 其星像的个数仍记为 N_k 。同时,可以得到第 k 帧和第 $k+1$ 帧一一对应的星像的运动方向,记为 $A(\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_{N_k}^k)$ 。由于图像存在平移和旋转变换,因此星像之间的运动方向可能会存在较大的差异,但是由于序列图像拍摄时间间隔很短,同一星像在 3 帧序列图像中对应的两条轨迹连线的方向相差不大。

6) 令 $k = k + 1$ 如果 $k < K$, 则返回步骤 2), 否则执行步骤 7)。

7) 最终得到连续运动的恒星点及其在序列图像中的运动轨迹,记为 $(D_c^1, D_c^2, \dots, D_c^K)$ 。其中, $c = 1, 2, \dots, C$, C 为 K 帧序列图像一一对应的高亮恒星的个数,且 $C \leq \min(N_1, N_2, \dots, N_k)$ 。

2.3 变换模型参数估算

由于恒星距离观测相机很远,可以认为序列图像服从缩放比例为 1 的仿射变换模型。根据上述算法求得的一一对应的高亮恒星点,利用基于 Hausdorff 距离的特征点集配准^[15]、基于凸包的特征匹配算法^[16]、基于三角形匹配算法^[17]、基于 SVD^[18] 的图像配准算法等均可以估计星图的全局运动参数(旋

转参数 $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$, 位移参数 $T = [t_x, t_y]^T$)。

2.4 基于星像质心坐标矩阵的图像配准

由于观测图像通常较大,如果单纯地利用全局运动参数对星图进行配准,需要对每个像素进行插值处理(通常用双线性插值),这无疑需要巨大的计算量。星图包括大面积的深空背景,对背景的插值旋转意义不大。另外,由于高亮恒星内部灰度变化非常大(16 bit 灰度图像相邻像素灰度变化值可达 2×10^4),对星图进行坐标变换与插值会使得变换后的恒星像素值误差较大,造成相邻图像差分后在高亮恒星位置仍然存在高于背景的像素点,不能实现

星图背景的滤除。

为了获得较好的探测效果,观测相机对目标成像信噪比通常大于 3 dB,对于本文所用的星图,统计发现实际的满足信噪比大于 3 dB 的像素通常只占有所有像素的 1%,其余 99% 的像素为星空背景,属于冗余信息。为了节约计算时间,提高星图配准效率,提出了基于星像质心坐标矩阵的图像配准算法,其核心思想是将图像转化为星像质心坐标矩阵形式,将星图之间的配准运算转换为星像质心坐标矩阵之间的运算,由于星像质心坐标矩阵所包含的数据量远小于整幅图像的数据量,因此,在很大程度上降低了计算量。

定义 2 时间序列为 $C(k)$, 其中 $k = 0, 1, 2, \dots, K$, 设在 $C(k), C(k+1)$ 中分别存在一个连通域 $A(k), A(k+1)$, 由连通域 $A(k)$ 形成的小目标图像为 $T_k = \{t_k(m, n), [m, n] \in A(k)\}$, 由连通域 $A(k+1)$ 形成的小目标图像为 $T_{k+1} = \{t_{k+1}(m, n), [m, n] \in A(k+1)\}$; 若 T_k 中至少有一点存在于 T_{k+1} 中,则认为 T_k 和 T_{k+1} 是相关的,记做: $T_k \cap T_{k+1} \geq 1$ 。即一个小目标在第 k 帧和第 $k+1$ 帧中是相关的。

星图配准步骤如下:

1) 定义信噪比: $SNR = 10 \log_{10}((I_s - \mu) / \sigma)$, 其中, I_s 为目标的灰度值。取 $Thr = \mu + 10^{0.3} \sigma$, 得到阈值水平为 Thr 的二值化图像

$$BinI_k(x, y) = \begin{cases} 1 & I_k(x, y) \geq Thr \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

2) $BinI_k$ 中每个非零连通区域可以认为是一个星像,对阈值水平为 Thr 的灰度图像所包含的每个星像区域求质心 (x_i, y_i) 和星等值 M_i , 便得到星图的星像质心坐标矩阵,如图 4 所示,其具体形式为

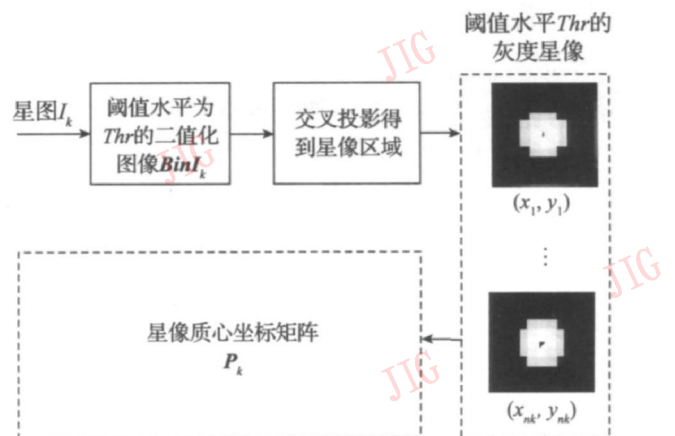


图 4 星图转化为星像质心矩阵示意图

Fig. 4 Transform of star-sky image to star centroid matrix

$$P_k |_{2 \times N_k} = \begin{bmatrix} x_1, x_2, \dots, x_{T_k} \\ y_1, y_2, \dots, y_{T_k} \end{bmatrix}$$

式中, T_k 为图像 $BinI_k$ 中非零连通区域的个数, 显然, P_k 的数据量远小于 $BinI_k$ 。

3) 对 P_k 中的点 (x, y) , 设 $P'_k = R \cdot P_k + t$ 。定义 2 可以等效为如果点 (x, y) 为背景恒星质心坐标, 对 P'_k 中的点 (x', y') , 理想情况下, 在 P_{k+1} 中会存在与之相等的点, 理想情况下配准后两者的质心坐标应该相等, 但是由于受到噪声的影响, 规定如果配准后两星像质心间距小于 2 pixel 则两者为同一恒星成像, 在图像 $BinI_k$ 中对应的 8-连通区域进行填充, 最终得到滤除恒星背景后的二值化图像。利用滤除背景后的二值化图像对原始星图进行掩模处理便可以得到包含空间目标和少量噪声的图像。

注意到步骤 3 虽然能够在很大程度上降低计算量, 但是算法还可以进行简化。步骤 2) 中计算连通区域质心坐标时得到的质心坐标通常会按照先行后列或者先列后行的顺序排列, 如图 5 所示。不失一般性, 假设按照先列后行的顺序排列。因此, 如果在 P_{k+1} 中存在与 $P_k(x, y)$ 对应的点, 其列坐标必定介于 $[y' - 2, y' + 2]$ 之间, 在 P_{k+1} 中仅搜索列坐标在 $[y' - 2, y' + 2]$ 的点集便可确定 P_{k+1} 中是否存在与 P_k 相关的区域, 这样对于 1024×1024 的图像, 理论上可以将搜索范围缩小到约为原来的 $1/250$ 。

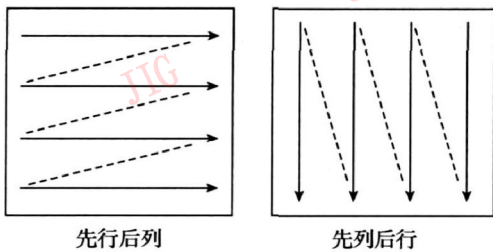


图 5 星像质心排列顺序示意图

Fig. 5 Target centroid range sequence

3 算法实验

利用本文算法对星空序列图像 ($1024 \times 1024 \text{ pixel}$) 进行实验, 图像背景均值 1739.4 标准差 15.3。在序列图中有 1 个目标, 以图像左上角为原点, 目标在第 1 帧的质心坐标为 $(874.5, 162.1)$ 。目标原始灰度值如图 6 所示。

1 787	1 780	1 798	1 768	1 778	1 728
1 807	1 821	1 826	1 798	1 768	1 769
1 789	1 824	1 825	1 820	1 785	1 756
1 774	1 810	1 809	1 831	1 808	1 793
1 777	1 808	1 813	1 782	1 761	1 767
1 731	1 757	1 766	1 772	1 748	1 750

图 6 目标原始灰度值

Fig. 6 Gray values of space target

利用本文算法对连续 10 帧星图进行处理, 图 7 为高亮恒星的星图特征点选取结果, 为了使图示更加清晰, 显示的为原始图像右下角 $1/4$ 大小 (行: 513~ 1024 列: 513~ 1024) 的局部子图, 图像显示灰度范围为 1770~ 2123, ‘○’ 标记为序列图像中一一对应的恒星星像, ‘□’ 标记为成像不稳定的恒星星像或噪声点。根据连续两帧之间的特征点, 利用 SVD 算法得到星图之间的平均旋转矩阵和平移向量,

$$R = \begin{bmatrix} 1.0002 & -0.0001 \\ 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}, T = [-1.37, -2.64]'$$

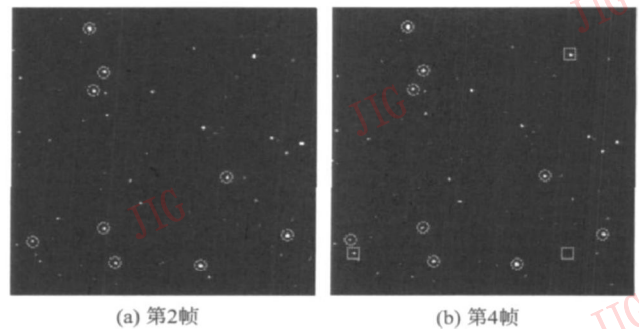


图 7 序列图像特征点提取结果

Fig. 7 Feature points of serial star-sky images

图 8 是根据变换模型参数对序列图像的星像质心坐标矩阵进行配准, 并对恒星背景进行滤除的二值化结果图 (原始图像左下角 $1/4$ 大小: 513~ 1024 行, 1~ 512 列的局部子图)。图 8(a) 为未进行杂散光抑制图像处理结果, 图 8(b) 为对杂散光进行抑制后图像处理结果。可以看出, 经过配准并进行恒星滤除后的图像能够有效地去除大量恒星背景的干扰, 保留弱小空间目标, 同时, 对杂散光抑制又有效地减少了图像中噪声的干扰。

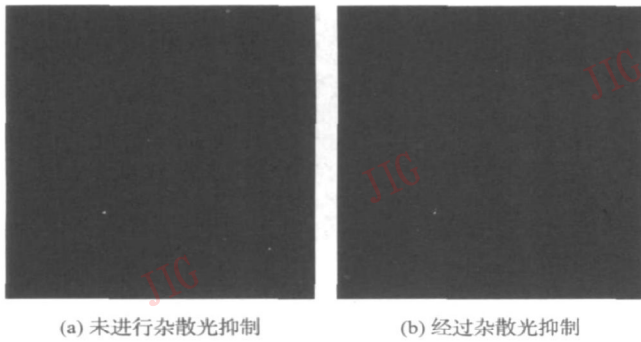


图 8 配准并滤除背景恒星的灰度图像(第 1 帧)

Fig. 8 Registration binary image filtered out background star

图 9 为连续 10 帧图像进行配准并对恒星滤除后的叠加图。由于未进行杂散光抑制,图 9(a)中仅在 5 帧图像中观察到空间目标的存在,图 9(b)中可以明显地看到目标的运动轨迹,其中目标运动轨迹在第 4 帧出现间断是由于受到恒星的遮挡未能检测出来。

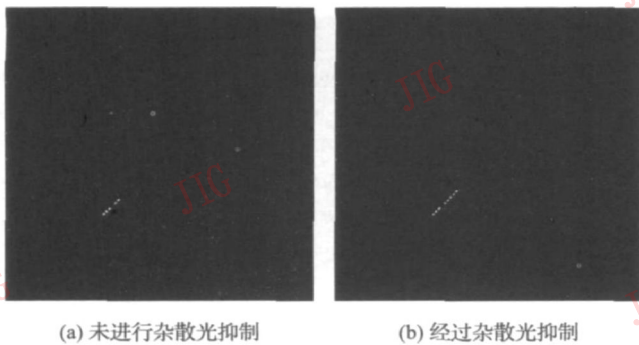


图 9 连续 10 帧图像配准后滤除恒星的叠加图

Fig. 9 Addition image of 10 registration images

本文提出了一种面向弱小目标检测的序列星图配准算法。主要解决了两个问题: 1) 序列星图全局运动参数的准确估计; 2) 利用基于星像质心坐标矩阵的方法对图像进行快速准确的配准。下面在上述两个方面将本文算法与传统算法进行比较。

图 10(a) 为对图像进行全搜索块匹配方法结果,并在相应的位置对非零运动参数进行了标注,全搜索匹配方法虽然耗时较大,但是其运动参数估计精度较其他搜索方法(三步搜索法、四步搜索法、菱形搜索法等)都要高,可以看出,全搜索块匹配方法估计得到的运动参数准确性和精度均不如本文算法。图 10(b) 为传统的帧差法对背景滤除的结果,(原始图像左下角 1/4 大小: 513~1 024 行, 1~512 列的局部子图,显示范围: 1 770~2 123)。首先利用全局运动参数对预处理后的图像进行校正,然后将校正后的图像相减可以看出,帧差法对大部分的

恒星未能滤除。造成这种现象的原因有两个,一是插值引入的误差,二是星像边缘灰度值不稳定导致帧差结果保留了部分边缘信息。对于序列星图,虽然理论上可以通过恒星和目标运动方向的不同来判断目标,但是在大量恒星存在的情况下,这种思路基本上是不可行的。

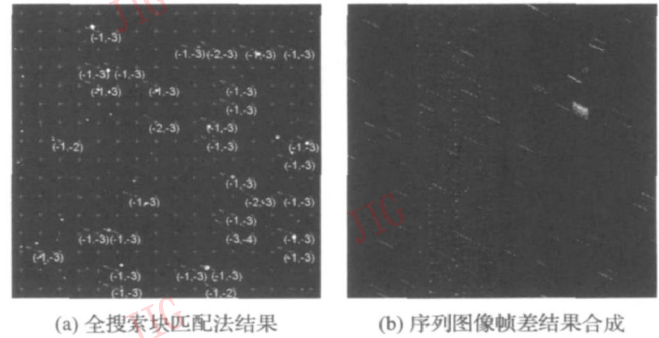


图 10 与传统算法比较结果图

Fig. 10 Result images of traditional algorithm

对 32 批次的序列图像(每批次约包含 120 帧图像)进行处理,结果表明,算法在提取一一对应的高亮恒星特征点方面取得了 100% 的正确率。另外,除了两个批次的观测数据由于目标太弱(目标峰值信噪比 < 3 dB),未能在配准后的图像中观测到目标,其他批次的图像中均能成功的观测到空间目标。

4 结 论

针对星空观测序列图像的性质,提出了一种面向弱小目标检测的序列星图的配准算法。算法利用一一对应的高亮恒星质心作为特征点求得变换参数,在配准过程将图像转化为星像质心坐标矩阵,结合面形态学算法直接对背景恒星进行滤除,省略了配准过程中的图像重采样步骤,提高了配准的精度,节约了大量的运算时间。

值得说明的是,由于序列星图空间目标检测受到大量恒星的干扰,恒星成像与空间目标成像同属于高频信息,且空间目标亮度介于恒星亮度和背景灰度值之间,因此,星空背景弱小目标检测基本不能借鉴云背景或海天背景弱小目标检测的思路。尽管许多学者在提取云背景或海天背景下弱小目标(≤ 3 dB)方面取得了一定的成果,但是在星空背景下如何高效率地提取信噪比 ≤ 3 dB 空间目标的算法还有待于进一步研究。本文的配准算法为检测成像峰值信噪比 ≥ 3 dB 的空间目标奠定了基础。

参考文献 (References)

- [1] Wang Dongfeng. A Study on Registration of Multimodal and Huge-Size Image [D]. Beijing Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2002. [王东峰. 多模态和大型图像配准技术研究 [D]. 北京: 中国科学院电子所, 2002.]
- [2] Barbara Zitova, Jan Flusser. Image registration methods: A survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, (21): 977-1000.
- [3] Viola P, William M Wells III. A algorithm by maximization of mutual information [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 24(2): 137-154.
- [4] Collignon A, Maes F, Delaere D. Automated multimodality image registration based on information theory [C] // *Proceedings of the Information Processing in Medical Imaging Conference*. Ile de Belder, France: Kluwer Academic Publishers, MA: Kluwer, 1995. 263-274.
- [5] Zhan Anjun, Chen Weij, Mao Shiyi. An image edge based algorithm for multisensor image registration [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2004, 26(5): 679-684. [谌安军, 陈炜, 毛士艺. 一种基于边缘的图像配准方法 [J]. *电子与信息学报*, 2004, 26(5): 679-684.]
- [6] Zhang Kunhua, Wang Jingru, Zhang Qiheng. Corner detection based on multi-feature [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(A): 319-324. [张坤华, 王敬儒, 张启衡. 多特征复合的角点提取方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2002, 7(A): 319-324.]
- [7] Mikolajczyk K, Schmid C. An affine invariant interest point detector [C] // *Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision*. Verlag London, UK: Springer, 2002. 128-142.
- [8] Lie W N, Chuang C H. Contour-based image registration with local deformation [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(5): 1405-1416.
- [9] Chen Weizhen, Zhang Chunhua, Zhou Xiaodong. Study of star-sky image background characteristics based on local histogram Gaussian fitting method [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(4): 230-233. [陈维真, 张春华, 周晓东. 基于局部直方图高斯拟合的星图背景性质研究 [J]. *红外技术*, 2008, 30(4): 230-233.]
- [10] Sun Jixiang. *Digital Image Process* [M]. Hebei Education Press, 1993. [孙即祥. *数字图像处理* [M]. 河北: 河北教育出版社, 1993.]
- [11] Li Xiaoming, Zhao Xunpo, Zheng Lian, et al. An image registration technique based on Fourier-Mellin transform and its extended applications [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(3): 466-472. [李小明, 赵训坡, 郑链, 等. 基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准方法及应用拓展 [J]. *计算机学报*, 2006, 29(3): 466-472.]
- [12] Cordelia Schmid, Roger Mohr, Christian Bauckhage. Evaluation of interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 37(2): 151-172.
- [13] Wang Zhaokui, Zhang Yulin. A algorithm for CCD star image rapid locating [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, 26(3): 209-214. [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.]
- [14] Peng Huafeng. Study on Simulation of Space Based Opto-electronic Telescope [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. [彭华锋. 天基光电望远镜系统建模仿真研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.]
- [15] Shu Lixia, Zhou Chengping, Peng Xiaoming, et al. Image registration based on Hausdorff distance [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(A): 1412-1417. [舒丽霞, 周成平, 彭晓明, 等. 基于 Hausdorff 距离图像配准方法研究 [J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(A): 1412-1417.]
- [16] Yang Zhengwei, Cohen F S. Image registration and object recognition using affine invariants and convex hulls [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1999, 8(7): 934-946.
- [17] Wang Chengnu, Zhao Na, Zhang Lili. Image registration and stitching based on triangle geometry similarity [J]. *Opto-Electric Engineering*, 2007, 34(8): 87-92. [王成儒, 赵娜, 张丽丽. 基于三角形几何相似性的图像配准与拼接 [J]. *光电工程*, 2007, 34(8): 87-92.]
- [18] Umeyama S. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(4): 376-380.