

文章编号 1004-924X(2016)02-0406-07

## 采用目标区域互信息的星空图像配准

杜斯亮<sup>1,2</sup>, 杨 博<sup>3,4\*</sup>, 王 密<sup>2</sup>, 方圣辉<sup>1</sup>

- (1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079;
2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;
3. 武汉大学 计算机学院, 湖北 武汉 430079;
4. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079)

**摘要:**提出了采用目标区域互信息的测度方法对星图进行精确配准以解决星图中存在噪声、伪星点、星点稀疏以及星图间的旋转等问题。首先对星图进行图像分割,检测出星点目标并对星点进行二值化处理;然后基于互信息配准模型,在含星点的目标区域上,利用 Powell 算法将最大互信息作为目标函数来指导图像间最优变换参数的搜索。分析了适用于互信息测度配准的星点分割算法,并论证了采用目标区域互信息的星图配准的可行性。对提出的算法与标准的互信息配准算法进行了对比。结果表明:提出算法的时间消耗与图像中星的数量有关,在图像大小为  $1\ 000 \times 1\ 000$  时,提出算法的加速比为标准算法的 3.4 倍。该算法在星图中存在噪声、伪星点、星点稀疏和旋转的情况下仍能进行准确配准,50 组实拍星图配准误差平均值为 0.138 2 pixel,满足了星空图像对精确配准的要求。

**关键词:**星空图像;星点目标区域;互信息;图像配准

**中图分类号:**TP751.1;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162402.0406

## Stellar image registration based on mutual information in object area

DU Si-liang<sup>1,2</sup>, YANG Bo<sup>3,4\*</sup>, WANG Mi<sup>2</sup>, FANG Sheng-hui<sup>1</sup>

- (1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
3. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
4. Collaborative Innovation Center of Geo-informatics, Wuhan 430079, China)

\* Corresponding author, E-mail:93341186@qq.com

**Abstract:** A measuring algorithm based on mutual information in an object area was proposed to register stellar images with noises, pseudo stars, sparse stars and the rotation between the images. Firstly, a stellar image was segmented to extract star points in the stellar image and the star points were processed with binarization. Then, on the basis of the mutual information model, the Powell algorithm was used to guide the search of the best transformation parameters in the object area by taking the maximal mutual information as the aim function. Furthermore, the star segmentation method suit-

收稿日期:2015-11-06;修订日期:2015-12-14.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB744201)

able for the proposed stellar registration algorithm was analyzed and the feasibility of the proposed algorithm was verified. The proposed algorithm was compared with normal mutual information registration algorithm, and the results show that the time consuming is relative to the number of stars in image, and the speed up ratio is up to 3.4 times that of the normal mutual information registration algorithm when the image size is  $1\ 000 \times 1\ 000$ . Experimental results demonstrate that the proposed algorithm achieves a high precision stellar registration with noises, pseudo stars, sparse stars and rotation. The average error of 50 groups of real stellar images is 0.1382 pixel. It concludes that the algorithm meets the requirements of space target detection for image registration.

**Key words:** stellar image; star object area; mutual information; image registration

## 1 引言

本文研究的星图是飞行器在太空中拍摄的以深空为背景的序列图像。星图中主要包括恒星、空间目标(主要指卫星)和背景噪声<sup>[1]</sup>。恒星和空中目标距离相机较远,其在 CCD(Charge Coupled Device)像平面上表现为较暗背景上的点状光斑,仅占据有限个元素。

图像配准是通过对两幅或多幅图像进行匹配,以确定图像间对应的投影变换关系。星图配准是星图处理中的一个重要环节。通过星图配准可以获得不同时刻星图之间的投影变换关系,该投影变换关系反映了不同时刻相机的姿态差别,进而可以用于调整相机姿态,实现对指定空域连续监测,其将为目标检测跟踪奠定基础<sup>[2]</sup>。同时,为了对星图中的运动目标进行检测,必须利用多帧图像的运动信息,故需要序列图像精确配准。

星图中的目标是点状光斑,没有纹理和形状特征,而星图背景噪声则表现为变化缓慢的低灰度区域,理论上认为其符合高斯或者泊松分布。另外星图中存在的杂散光、宇宙射线和高能粒子会在图像中产生大量的虚假目标;星图间可能存在一定的旋转和平移。这些都给星图配准带来了一定的困难。文献[3]将尺度不变特征变换(SIFT)应用于星图匹配,其首先检测 SIFT 特征、构建 SIFT 描述符,然后进行匹配。SIFT 对星图间存在旋转、平移、背景不一致等现象具有良好的匹配性能,但对于星点稀疏,即特征贫乏的图像处理效果不佳,适合于对星点稠密的图像进行匹配。文献[4]提出基于不变特征描述符(SURF)实现星点匹配,其匹配速度要比 SIFT 算法快得多。韩艳丽等人采用构建星点间三角形进行匹配,由

于星图中存在伪星点,会造成匹配困难<sup>[5]</sup>。文献[6]通过将 Fourier-Mellin 变换和 SURF 算法相结合实现观测图像的匹配。该方法解决了文献[4]中对于待匹配图像的旋转角度较大时,SURF 算法提取观测图像匹配特征点能力严重下降的问题。以上的匹配算法得到匹配星点后,需要采用如 RANSAC 方法先剔除误匹配星点,再利用最小二乘法估算出变换参数,实现两幅图像的配准<sup>[7]</sup>。

鉴于互信息匹配的算法具有匹配精度高、抗遮挡、抗随机噪声等优点,在医学影像、遥感影像配准领域得到广泛的应用<sup>[8-11]</sup>。本文将互信息配准的算法应用到星图配准中,以解决星图中噪声、伪星点和星点稀疏的情况。为了加快互信息配准算法的效率,本文还提出了面向目标区域的星图配准算法。首先采用星图分割检测星图中的星点并进行二值化,以提取星点目标区域,然后在目标区域上对待配准影像进行空间几何变换,统计联合直方图、计算互信息、利用 Powell 算法依据最大互信息理论判断所得参数是否最优,参数最优时进行影像配准,此时的空间几何变换参数即为配准参数。

## 2 星点检测

星点检测是从传感器获取的星图中提取星点目标和亮度信息,其是后续图像配准的基础性工作。本文采用自适应阈值法进行二值化分割<sup>[12-13]</sup>,其能较好地保留暗星和星点边缘的低灰度值部分,能将大部分正确的星点提取出来。二值化分割如式(1)所示,由式(1)可知,当图像点 $(i, j)$ 灰度值低于阈值  $T$  时,该点灰度取 0,否则像素值取 255,这里阈值  $T$  由公式(2)确定:

$$f(i, j) = \begin{cases} 255, & f > T(i, j) \\ 0, & f \leq T(i, j) \end{cases}, \quad (1)$$

$$T(i, j) = E(i, j) + 3 * \delta(i, j), \quad (2)$$

式中:  $E(i, j)$  是图像像素点  $(i, j)$  处  $5 * 5$  邻域的平均值,  $\delta(i, j)$  是点  $(i, j)$  处  $5 * 5$  邻域内的方差, 二者的计算式分别为:

$$E(i, j) = \frac{\sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 f(i+m, j+n)}{25}, \quad (3)$$

$$\delta(i, j) = \sqrt{\frac{\sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 (f(i+m, j+n) - E(i, j))^2}{25}}. \quad (4)$$

### 3 星图互信息配准

互信息可用于图像配准的理论依据是: 如果两幅图像已经配准, 则它们的互信息值  $M(A, B)$  为极大值<sup>[10]</sup>, 其可由式(5)~(8)计算得到:

$$H(A) = - \sum_a P_A(a) \log_2 P_A(a), \quad (5)$$

$$H(B) = - \sum_b P_B(b) \log_2 P_B(b), \quad (6)$$

$$H(A, B) = - \sum_{a,b} P_{AB}(a, b) \log_2 P_{AB}(a, b), \quad (7)$$

$$M(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B), \quad (8)$$

其中:  $P_A(a)$  和  $P_B(b)$  分别是系统 A 和 B 完全独立时的概率分布,  $P_{AB}(a, b)$  是系统 A 和 B 的联合概率分布<sup>[9]</sup>,  $H(A)$  和  $H(B)$  分别是系统 A 和 B 的熵,  $H(A, B)$  是他们的联合熵。

星空图像中, 相邻两帧图像的变化较小, 其背景运动方式主要是平移和旋转<sup>[6]</sup>, 因此选择刚体变换模型作为相邻帧的变换模型。对于刚体变换, 前后两帧星图待配准的参考星图 R 和浮动星图 F 中像素坐标之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中:  $(x_r, y_r)$  和  $(x_f, y_f)$  分别为参考星图 R 和浮动星图 F 中像素的坐标;  $\Delta x, \Delta y$  分别为配准时  $x$  和  $y$  方向上的平移量;  $\theta$  为配准时的旋转角度。

在星图配准过程中, 参考星图 R 保持不变, 通过不断变换公式(9)中的平移量  $\Delta x_c, \Delta y_c$  和旋转角度  $\theta_c$ , 以对浮动星图 F 进行重构。计算参考星图 R 和投影图像  $F_c$  的互信息测度, 当互信息

测度达到最大值时, 参考星图 R 和浮动星图 F 配准, 此时的平移量  $\Delta x_c, \Delta y_c$  和旋转角度  $\theta_c$  即为帧间星图的配准参数。本文使用 Powell 算法进行极值搜索, 以寻找最优平移量  $\Delta x_c, \Delta y_c$  和旋转角度  $\theta_c$ <sup>[14]</sup>。

### 4 目标区域的星图配准

标准互信息的计算量非常大, 匹配速度较慢。为了减少互信息的计算量, 尝试根据星图的辐射特性, 寻找互信息的快速和简化方法。

#### 4.1 星图二值化

若给定图像的灰度级为  $L$ , 若利用公式(5)、(6)计算图像熵  $H(R)$  和  $H(F)$ , 则要运算  $L$  次, 利用公式(7)计算图像的联合熵  $H(R, F)$ , 则要运算  $L^2$  次。减少  $L$  的值, 可使运算明显减少。若取  $L=2$ , 则图像的灰度级变成 2, 此时相当于对原始图像做二值化, 不仅能够减少运算复杂度, 并且能够突出恒星目标、抑制背景噪声和虚假目标。

#### 4.2 星点目标区域的互信息测度计算

计算图像熵和联合熵时, 需要遍历整幅图像。二值化后的星图图像简单, 只存在星点目标和背景, 其中背景占大多数, 其像素值为 0, 星点目标占少数, 其像素值为 255。而计算星图的信息熵时, 不需要遍历整幅图像, 仅需遍历含星点目标的区域, 计算像素为 255 的概率分布, 即能求得像素值为 0 的概率分布, 如公式(10)所示, 再根据公式(11)计算图像的信息熵。

$$G(0) = 1 - G(255), \quad (10)$$

$$H_x = -((1 - G(255)) * \log(1 - G(255)) + G(255) * \log(G(255))), \quad (11)$$

式中  $G(0), G(255)$  为星图中像素为 0 和 255 的概率分布。

计算星图间的联合概率分布时, 并不需要遍历整幅影像, 仅遍历参考星图或浮动星图中像素为 255 时, 相应星图上像素为 0 和 255 的情况。如公式(12)、(13)所示:

$$G(0, 0) = 1 - (G(0, 255) + G(255, 0) + G(255, 255)), \quad (12)$$

$$H_{xy} = -((1 - (G(0, 255) + G(255, 0) + G(255, 255))) * \log(1 - (G(0, 255) + G(255, 0) + G(255, 255))) + G(0, 255) * \log(G(0, 255)) + G(255, 0) * \log(G(255, 0)) + G$$

$$(255, 255) * \log(G(255, 255))), \quad (13)$$

式中  $G(0, 255)$  为原始影像像素为 0 时, 对应浮动影像像素值为 255 的概率分布。同理可知  $G(255, 0)$  和  $G(255, 255)$  的意义。

这里假设找到最优互信息测度的搜索步数为  $n$ , 图像大小为  $w \times h$ , 含星点目标区域的概率为  $\rho$ , 未改进前的互信息测度配准的计算量可粗略表示为:

$$O_1 = 50 * wh + 8 * wh * n, \quad (14)$$

其中  $50 * wh$  为星点提取与二值化的计算量,  $8 * wh * n$  为最优互信息测度搜索的计算量。改进后的基于目标区域的互信息配准的计算量可粗略表示为:

$$O_2 = 50 * wh + wh + 8 * wh * n * \rho, \quad (15)$$

其中  $50 * wh$  为星点提取与二值化的计算量,  $wh$  为星点目标区域提取的计算量,  $8 * wh * n * \rho$  为采用目标区域最优互信息测度搜索的计算量。则加速比可表示为:

$$\frac{O_1}{O_2} = \frac{50 + 8n}{51 + 8\rho n} \quad (16)$$

星图中星点目标区域一般不超过 15%, 这里假设  $\rho = 15\%$ , 假如最优互信息测度的搜索步数  $n$  为 30, 则此时加速比可达 3.9 倍。

本文采用交叉投影法进行星点目标区域提取, 通过使图像向两个方向进行灰度投影可实现星点的分离和粗定位, 如图 1 所示。

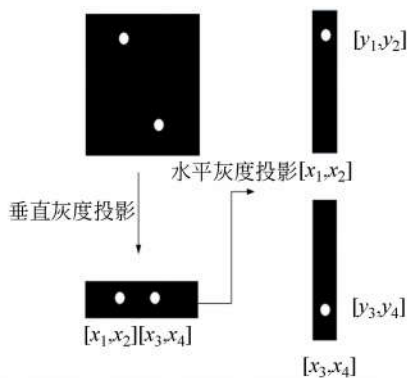


图 1 交叉投影法示意图

Fig. 1 Schematic of cross projection method

根据星图的辐射特性可知, 星图中含有大量的噪声, 对星图进行二值化分割能够抑制背景噪声和突出恒星目标, 同时概率分布的计算也从 256 级降到 2 级, 计算量显著降低。由于星图中

大部分都是背景, 而计算概率分布和进行浮动影像投影变换的过程中, 只需遍历含星点目标区域, 故计算量得到减少, 同时对结果并没有影响。另外在进行浮动影像投影重构的过程中, 计算量也会减少, 综上可知, 此时互信息的计算量大量减少。本文改进后的采用星点目标区域进行星图配准的流程如图 2 所示。

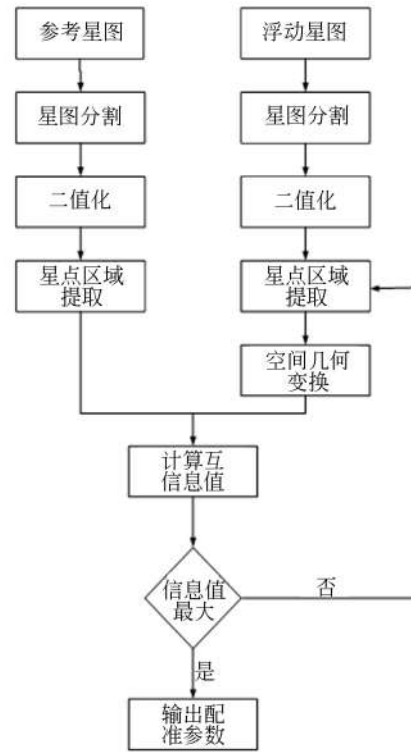


图 2 星点目标区域互信息的星图配准流程

Fig. 2 Flow chart of stellar images registration based on mutual information in star object area

## 5 实验结果与分析

### 5.1 目标检测精度对配准结果的影响

为了讨论目标检测精度对后续互信息配准算法的影响, 生成了 3 组星图对, 星图对 1 和星图对 2 分别含有 150、200 个正确星点, 星图对 3 含有 200 个正确星点和 20 个伪星点。每组星图对方向变换的互信息测度的计算结果如图 3 所示。由图 3 可知, 星图对 2、3 相对于星图对 1 的互信息测度曲线更陡峭, 更有利于极大值搜索, 而星图对 2 和星图对 3 的互信息测度曲线近似, 并没有因为伪星点的加入而导致曲线斜率变化。由此可以

得出如下结论:星图中所含的正确点对数越多,曲线越陡峭、峰值越突出,更有利于互信息最大值的搜索,同时星图中含有少量的伪星点并不影响互信息测度的搜索。

本文采用自适应阈值法进行分割<sup>[12]</sup>,其能较好地保留暗星和星点边缘低灰度值部分,能将大部分正确星点提取出来,同时也会分割出少量的伪目标<sup>[13]</sup>。正确星点越多,越有利于互信息值最大值搜索,同时少量的伪星点并不影响最优互信息测度的搜索,这与实验结论一致。

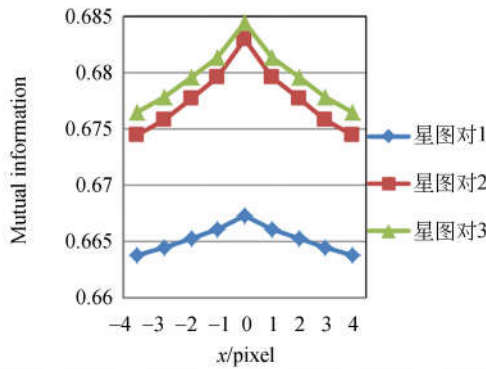


图 3 互信息值结果

Fig. 3 Results of mutual information

### 5.2 目标区域星图配准算法的时间消耗

本文针对星图的辐射特性,在标准的互信息配准算法的基础上,进行优化设计,提出了采用目标区域的星图配准算法。本文选取 8 张星图影像,影像大小从 200×200 到 1600×1600,将其与原始互信息配准算法和基于 surf 的星图配准算法的耗时进行比较,其中包括预处理星点检测的过程,结果见图 4。

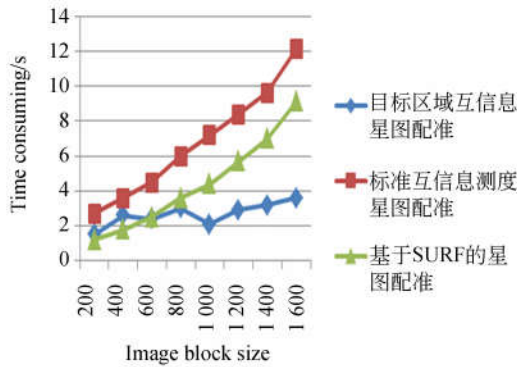


图 4 星图配准算法的耗时

Fig. 4 Time consuming of stellar images registration algorithm

由图 4 可以看到,本文采用目标区域的互信息星图配准算法的速度最优,在图像大小为 1000×1000 时,改进后速度为 2.1 s,标准的互信息测度星图配准算法为 7.2 s,本文较其加速比达 3.4 倍。

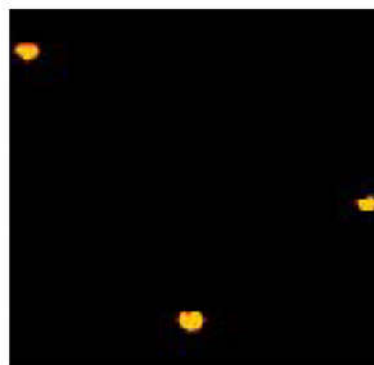
### 5.3 星图的稀疏、伪星点对本文配准算法的影响

本文选择相邻时刻拍摄的两幅星图作为实验对象,星图大小为 1 024×1 024,经星点分割后,其中所含的正确星点数目为 27 个,伪星点数目为 6 个。采用本文提取方法进行星图配准,结果如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。图 5(a)为星图对配准后,将投影变换到一幅图像上。为了便于查看配准结果,其中参考星图星点颜色为红色,浮动影像星点颜色为黄色,其局部细节由图 5(b)给出,两张星图得到了配准。由图 5 可以看到,星图的稀疏程度对本文的基于互信息测度的星图配准算法并无影响。



(a) 星图配准图

(a) Registration of two stellar images



(b) 局部放大图

(b) Local enlarged image

图 5 星图配准结果

Fig. 5 Results of stellar image registration

#### 5.4 配准精度

为了测试本文方法的配准精度,本文选取50幅星图进行实验,将它们分为几组,每组中选取其中一幅作为参考图像,待配准图像由原图像变换得到,变换参数为 $\Delta x, \Delta y, \theta$ ,其中 $\Delta x, \Delta y$ 为平移参数, $\theta$ 为旋转参数,星图大小为 $1\ 024 \times 1\ 024$ ,所得配准精度如图6所示。

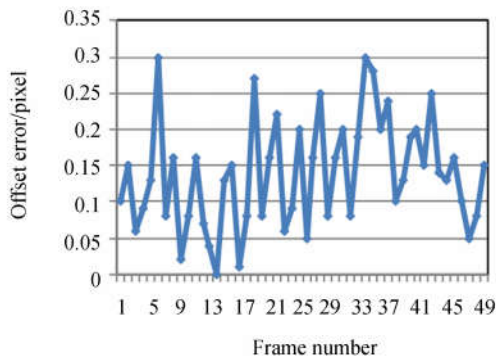


图6 星图配准误差

Fig. 6 Errors of stellar image registration

通过计算得到的配准误差均值为0.138 2 pixel。利用文献[15]中的方法对图像进行处理得到的配准误差均值为0.234 6 pixel。故本文配

准算法的精度要高于文献[15]方法,这主要因为,文献[15]需要提取星点质心,星点质心的提取过程存在误差<sup>[16]</sup>;而本文是直接对整幅影像的互信息测度进行星图配准,不需要提取星点质心。

## 6 结 论

本文提出了一种采用目标区域的星图配准算法。该算法通过对实拍星图进行分割,检测星图中的星点并进行二值化,然后对待配准影像中含有星点目标的范围进行空间几何变换,并统计联合直方图、计算互信息、利用Power算法依据最大互信息理论寻找配准参数。文中通过分析适宜于星图配准的星点分割算法,本文采用自适应阈值法进行图像分割。最后,采用不同大小、不同星点数量的星图对本文算法的耗时进行测试,结果显示:在星图大小为 $1\ 000 \times 1\ 000$ 时,本文算法的加速比较标准的互信息配准算法高达3.4倍。采取实拍星图对本文提出的算法进行验证,结果显示本文算法能够对含有伪星点的星图进行配准,星图的疏密程度对本文配准算法并无影响,同时50组实拍星图配准后图像的误差均值为0.138 2 pixel,满足星空图像精确配准的要求。

#### 参考文献:

- [1] 宣丽,李大禹,刘永刚. 液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望[J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 1-9.  
XUAN L, LI D Y, LIU Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 1-9. (in Chinese)
- [2] 张春华,陈标,周晓东. 运动背景星空图像中小目标的运动轨迹提取算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 524-530.  
ZHANG CH H, CHEN B, ZHOU X D. Small target trace acquisition algorithm for sequence star images with moving background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 524-530. (in Chinese)
- [3] RUIZ-DEL-SOLAR J, LONCOMILA P, ZORZI P. Applying SIFT Descriptors to Stellar Image Matching [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin,

2008: 5197, 618-625.

- [4] 翟优,曾奕,熊伟. 基于不变特征描述符实现星点匹配[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2531-2539.  
ZHAI Y, ZENG L, XIONG W. Star matching based on invariant feature descriptor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2531-2539. (in Chinese)
- [5] 韩艳丽,刘峰. 基于三角形匹配的空间小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3134-3140.  
HAN Y L, LIU F. Small targets detection algorithm based on triangle match space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3134-3140. (in Chinese)
- [6] 沈同圣,张健,姜树理. 面向目标检测的空间观测图像精确配准[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2205-2213.  
SHEN T SH, ZHANG J, LOU SH L. Precise registration of space observation images for target detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2205-2213. (in Chinese)
- [7] 张健,姜树理,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]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 45(1): 88-93. (in Chinese)
- [8] 张红颖, 张加万, 孙济洲. 改进 Demons 算法的非刚性医学图像配准[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 145-150.  
ZHANG H Y, ZHANG J W, SUN J ZH. Non-rigid medical image registration based on improved Demons algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 145-150. (in Chinese)
- [9] 武治国, 李桂菊. 动态目标识别中的实时复杂巡航场景运动检测[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 844-849.  
WU ZH G, LI G J. Real-time complex cruise scene detection technology in target recognition[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 844-849. (in Chinese)
- [10] 王金玲, 贺小军, 宋克非. 采用区域互信息的多光谱与全色图像融合算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2757-2764.  
WANG J L, HE X J, SONG K F. Image fusion algorithm of multi-spectral and panchromatic images adopting region mutual information[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2757-2764. (in Chinese)
- [11] AN L, LI M, ZHANG P, et al.. Multicontextual mutual information data for SAR image change detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(9): 1863-1867.
- [12] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers - A tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [13] 许威. 星点快速提取与高精度定位技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
XU W. *Star Fast Extraction and High Accuracy Centroid Estimation of Star Camera*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [14] 乔玉龙, 赵源萌, 张存林, 等. 基于混合 Powell 法的太赫兹/可见光双波段图像配准[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 159-165.  
QIAO Y L, ZHAO Y M, ZHANG C L, et al.. Terahertz/visible dual-band image registration based on hybrid Powell algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 159-165. (in Chinese)
- [15] 焦继超, 赵保军, 唐林波. 一种基于非降采样 Contourlet 变换和 MLESAC 的星空图像配准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2686-2690.  
JIAO J CH, ZHAO B J, TANG L B. Space image registration algorithm based on nonsubsampling Contourlet transform and MLESAC[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(12): 2686-2690. (in Chinese)
- [16] 潘波, 杨根庆, 刘勇. 星点质心定位算法最优门限研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1787-1792.  
PAN B, YANG G Q, LIU Y. Study on optimization threshold of centroid algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1787-1792. (in Chinese)

## 作者简介:



杜斯亮(1990—),男,湖北荆门人,博士研究生,2012年于中国地质大学(武汉)获得工学学士学位,2014年于武汉大学获得工学硕士学位,主要从事图像处理及计算机视觉方面的研究。E-mail: dusi@whu.edu.cn

## 通讯作者:



杨博(1984—),男,湖北武汉人,博士,2014年于武汉大学获得工学博士学位,主要从事星地协调高分辨率遥感数据处理的理论和方法研究。E-mail: 93341186@qq.com