

基于改进对数极坐标变换的星图识别算法

闫旭亮¹, 徐望², 杨功流^{1*}, 王璐¹¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;²海军上海航保修理厂, 上海 200083

摘要 星图识别的速度决定了姿态更新率。针对基于对数极坐标变换的星图识别算法的循环位移带来的耗时间题,提出了一种改进算法。首先寻找距离视场中心最近的星点来构造新的直角坐标系,并转换为极坐标,然后将星点坐标投影至距离轴,构造星模式的特征向量。由于极坐标变换在距离轴上具有旋转不变性,所以避免了循环位移带来的耗时间题。仿真表明,所提算法平均识别时间减少到传统算法的 8.4%,受到位置噪声影响时的识别率下降趋势更小,受到伪星和缺星影响时的识别率依旧高于传统算法。由于受到噪声影响时星模式相较于由恒星构成的三角形模式改变较大,所提算法的识别成功率总体上仍会低于三角形识别算法。

关键词 图像处理; 星图识别; 坐标变换; 天文定位; 星敏感器; 特征向量

中图分类号 V448.25+3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1010001

Star Map Recognition Algorithm Based on Improved Log-Polar Transformation

Yan Xuliang¹, Xu Wang², Yang Gongliu^{1*}, Wang Lu¹¹ School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;² Navy Shanghai Aviation Maintenance Repair Factory, Shanghai 200083, China

Abstract The speed of star map recognition determines the attitude update rate. To solve the time-consuming problem of cyclic displacement in the star map recognition algorithm based on log-polar transformation, we improve the algorithm. First, we search for the star point nearest to the center of the field of view, and construct a new rectangular coordinate system. The rectangular coordinates are then converted to polar coordinates. After projecting the star coordinates onto the distance axis, we construct a feature vector of star patterns. Because the polar coordinate transformation is rotationally invariant on the distance axis, the time-consuming problem causing by the cyclic displacement is avoided. In a simulation evaluation, the average recognition time of the proposed algorithm was reduced to 8.4% that of the traditional method, but this performance was slightly degraded by positional noise. The recognition rate of the proposed algorithm was higher than that of the traditional algorithm when the data were affected by pseudostars and missing stars. Under the influence of noise, star patterns are more changeable than triangle patterns, so the recognition rate of the proposed algorithm is generally lower than that of the triangle-recognition algorithm.

Key words image processing; star map recognition; coordinate transformation; astronomical positioning; star sensor; feature vector

OCIS codes 100.1160; 100.5010; 150.1135; 120.6085

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-11-15; 录用日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501600)

* E-mail: yanggongliu@buaa.edu.cn

1 引言

作为姿态测量元件,星敏感器在卫星、飞船等航天器中起着非常的作用,而星图识别是星敏感器完成任务的重要一环^[1-3]。自主的星图识别算法可以在没有任何先验信息的情况下确定航天器的姿态^[4]。星图识别的速度影响姿态确定的快慢^[5]。因此,研究一种快速、高效的识别算法具有重要的意义^[6-7]。

星图识别算法大致可以分为两类。第一类是将视场内的星图认为是整个星图的一部分,利用星对角距和星等信息进行匹配,主要包括三角形算法和多边形算法^[8-10]。三角形算法的导航星数目比较庞大,还存在冗余匹配问题,这导致匹配耗时较长,并且识别率易受到噪声影响。虽然有学者提出了改进算法以及多边形算法,但都是以三角形算法为基础的,算法的特征向量维数低和匹配冗余问题并没有从根本上解决。第二类认为每颗星都具有伴星构成的不同的模式,比较典型的有栅格算法^[11]。与三角形算法比,栅格算法降低了位置噪声的影响,但构造星模式时正确选取邻星的概率并不高,影响正确的模式构建。

对数极坐标变换(LPT)具有的特性使其在目标识别、字符识别等领域有着广泛的应用^[12-13]。有学者将 LPT 引入星图识别中,研究发现 LPT 算法对噪声不敏感,具有较高的识别精度^[14-16]。但在 LPT 算法中,对两个特征向量进行比较时,需要进行循环移位,这无疑增加了耗时。

为了减少星图匹配的时间,在 LPT 算法的基础上提出了一种改进算法。首先寻找距离视场中心最近的星,然后以该星为原点建立新的直角坐标系,并利用 LPT 将直角坐标转换为极坐标。然后将恒星坐标投影到距离轴,构造该星的特征向量。与 LPT

算法相比,所提算法得到的特征向量具有旋转不变性,不需要循环移位,从而减少了识别时间,提高了效率。

2 基本原理

星图识别是为了确定视场中恒星的坐标,进而计算载体的姿态。通过星敏感器拍摄星图,对星图进行阈值分割、质心提取等操作,利用星图识别算法,可以得到和观测星相匹配的导航星。之后再利用识别结果,就可以计算出姿态^[17]。

2.1 LPT 算法

在人类视网膜表面和视觉皮层之间存在一种 Log-Polar 映射,此映射对具有尺度、位移和旋转不变性的目标识别有着重要的作用。Log-Polar 变换将直角坐标系映射到极坐标系,将图像的旋转和缩放转换为单一的位移变化,使问题得到简化。设恒星在平面直角坐标系的坐标为 (x, y) ,在极坐标系下的坐标为

$$r = \ln \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (1)$$

$$\theta = \begin{cases} \arctan(y/x) & x > 0, y > 0 \\ \pi + \arctan(y/x) & x < 0 \\ 2\pi + \arctan(y/x) & x > 0, y < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: r, θ 为极坐标系下的极径和极角。在星图识别过程中,选取视场内的一颗恒星为主星,将其视为极坐标系的原点,在半径为 R 的邻域内的恒星构成该主星的星模式。根据(1)、(2)式计算出 LPT 结果后,将星点投影至角度轴,并构造特征向量进行匹配。如图 1 所示,当星图发生旋转时,星点的角度值将沿角度轴循环平移,使得同一星模式的特征向量不同。星敏感器拍摄星图时的旋转角度未知,所以在对星模式的特征向量和导航星特征库进行比较时需要进行循环平移。

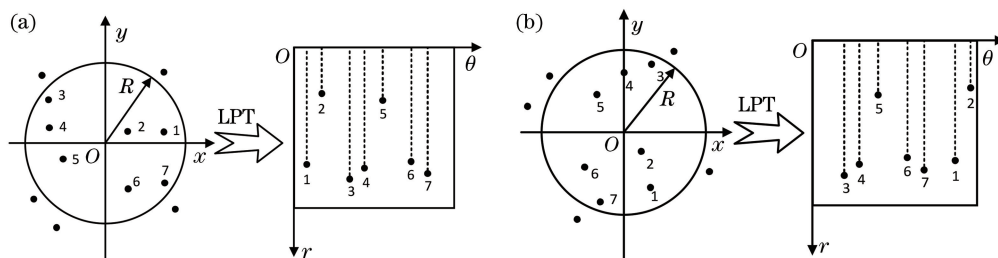


图 1 星图 LPT 结果。(a) 旋转前;(b) 旋转后

Fig. 1 LPT results of star map. (a) Before rotation; (b) after rotation

2.2 改进算法

当星图发生旋转时,星点在角度轴的投影会左右平移,但因为各星点之间的距离不会改变,据

此提出了改进算法。首先选取主星,并将半径为 R 的邻域内的星点在直角坐标系的坐标转换为极坐标系的坐标,然后将星点投影至距离轴。旋转

前后投影结果如图 2 所示,可以看出旋转前后投影结果不变,这样得到的星模式的特征向量是唯

一的,也就避免了平移操作。

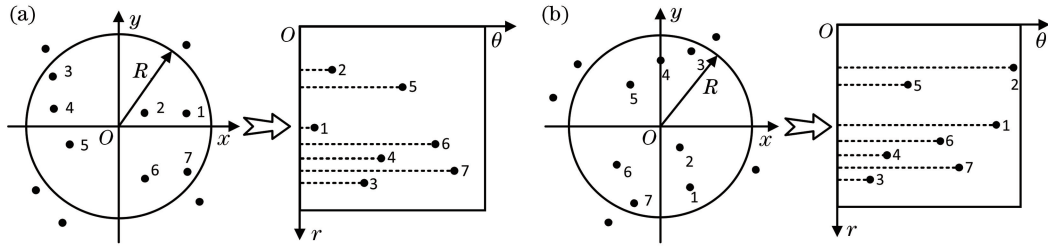


图 2 改进算法的星图变换结果。(a)旋转前;(b)旋转后

Fig. 2 Results of star map transformation using the improved algorithm. (a) Before rotation; (b) after rotation

设恒星在平面直角坐标系的坐标为 (x, y) 。选取主星后,将主星视为新的直角坐标系的坐标原点,可得到新的直角坐标系下星点的新坐标 (x', y') ,变换公式为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: (x_s, y_s) 为主星在原直角坐标系的坐标。

再根据直角坐标到极坐标的变换公式,极坐标系下的新坐标为

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2}, \quad (4)$$

$$\theta = \begin{cases} \arctan(y'/x') & x' > 0, y' > 0 \\ \pi + \arctan(y'/x') & x' < 0 \\ 2\pi + \arctan(y'/x') & x' > 0, y' < 0 \end{cases}. \quad (5)$$

2.3 星模式特征向量的构建

靠近视场边缘的星由于缺少邻星,不能由观测星构造出完整的星模式。为了尽可能多地得到完整的邻星,在星图识别过程中,常常选取靠近视场中心的恒星作为新的直角坐标系的原点,该星的坐标 (x_s, y_s) 应满足

$$s = \min_j \{ \sqrt{x_j^2 + y_j^2} \}, j = 1, \dots, N, \quad (6)$$

式中: N 为视场中恒星的个数。得到观测星的极坐标后向距离轴投影,即可得到特征向量。为了增强算法的鲁棒性,当向距离轴投影时,摒弃用 0 和 1 表示有无投影,而选用投影点的个数来表示距离轴均分后每一个间隔对应的特征向量中的元素。邻星和主星的距离为 $0 \sim R$, 设 r 轴的分辨率为 n , 则 r 轴上的距离分量为 R/n 。假设邻星在距离轴上的投影落于第 i 个间隔的个数为 m 。则第 i 个距离间隔中,投影点的个数表示为

$$a_i = m, i = \lceil r \times n/R \rceil, i \in (1, n), \quad (7)$$

式中: r 为邻星到主星之间的距离; $\lceil \cdot \rceil$ 表示对符号内

的数向正无穷方向取整。则第 i 个距离间隔对应的 r 的取值为 $[(i-1) \times R/n, i \times R/n]$ 。如果第 i 个距离轴上的间隔无星点的投影,则 $a_i = 0$ 。根据星点在距离轴上的投影结果,可以得到每个距离间隔对应特征向量中元素的值。得到的主星 s 对应的特征向量为

$$\mathbf{e}_s = (a_1, \dots, a_i, \dots, a_n). \quad (8)$$

通过上述方法,就可以得到每一个主星的星模式对应的特征向量,将这些特征向量储存起来就构成了导航星库。根据星图中的观测星,得到对应的特征向量后,和导航星库进行比较,选取匹配度最高的特征向量对应的导航星信息作为匹配的结果,就完成了星图匹配任务。

设导航星库中的特征向量为 \mathbf{e}_d , 由星图观测星得到的特征向量为 \mathbf{e}_s , 则两个特征向量的匹配度用特征向量之差的绝对值的和来衡量。

$$\text{match}(\mathbf{e}_s, \mathbf{e}_d) = \sum_{i=1}^n \text{abs}[\mathbf{e}_s(i) - \mathbf{e}_d(i)], \quad (9)$$

$$d = 1, 2, \dots, N',$$

式中: N' 为导航星库中星的个数; $\text{abs}[\cdot]$ 为取绝对值。 $\text{match}(\cdot)$ 值越小,表示两个特征向量匹配度越高。

利用上述方法进行特征向量匹配时需要对导航星库中的所有向量进行比较。为了避免全局比较带来的时间消耗,考虑用特征向量中非零的元素个数作为筛选的标准,导航星库中的特征向量的非零个数和当前星图所对应的特征向量的非零个数接近的情况下才进行比较匹配。同时,导航星库储存特征向量时可以按照非零个数升序排列,当导航星库中特征向量的非零个数超出一定范围后,余下的导航星库就无需进行匹配,这样就避免了全局比较匹配带来的时间消耗问题。特征向量匹配方法为

$$y = \min[\text{match}(\mathbf{e}_s, \mathbf{e}_d)], n'_d \in [n'_s - \epsilon_1, n'_s + \epsilon_2], \quad (10)$$

式中: n'_d 为特征向量 e_d 的非零个数; ϵ_1, ϵ_2 均为特征向量的非零个数的偏差值。因此, 导航星库中每个星模式记录的元素组成为编号 i_d , 非零个数 n' 和特征向量 e , 即

$$r_{\text{record},i} = \{i_d, n'_i, e_i\}, i = 1, 2, \dots, N'. \quad (11)$$

综上所述, 改进算法的步骤如下。

1) 根据星图中观测星的坐标, 选取距离视场中心最近的星为主星, 根据半径 R 确定主星的邻星;

2) 利用(3)~(5)式, 求取邻星在极坐标系下的坐标;

3) 将星点投影至距离轴, 根据构造规则, 得到该星模式对应的特征向量并计算非零个数;

4) 以非零个数为筛选量, 利用(10)式寻找匹配星, 完成星图匹配。

3 仿真实验

3.1 仿真条件

天文星表中若缺失恒星的星等、赤经和赤纬信息, 该星将不能作为导航星来使用。选取星等范围时, 若星等越大, 则导航星库数目呈指数增加, 增加星图匹配时间; 若星等过小, 生成星图时, 主星附近邻星数目太少, 将造成冗余匹配, 且小于 3 颗星时, 将无法计算星敏感器的姿态。因此, 选取依巴谷星表中星等小于 6 的恒星作为导航星来完成星图匹配任务。用于模拟生成星图的星敏感器分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 视场大小为 $12^\circ \times 12^\circ$, 构造星模式时, 选取半径 $R = 6^\circ$, 分辨率 $n = 35$, 特征向量非零个数允许的偏差项设置为 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2$, 硬件配置为 Intel 2.5G CPU, 4G 内存。

3.2 仿真结果

随机选取星敏感器的光轴指向, 拍摄得到星图图像。对星图进行处理后, 提取出星点, 选取距离视场中心最近的星为主星, 半径 R 范围内的星为邻星, 构造星模式, 计算出对应的特征向量, 完成星图匹配。

为了探究位置噪声对 LPT 算法改进前后影响的差异, 在正确识别到星点坐标的基础上增加位置噪声, 并以此为输入量来构造特征向量进行星图识别。星图识别的正确率随位置噪声的变化关系如图 3 所示。星图识别成功率结果表明, 改进算法的识别率比 LPT 算法高, 对噪声有更强的抗干扰能力。虽然在起始时两种算法的识别率相差无几, 但是当位置噪声为 0.5 pixel 时, 改进算法识别率为 98.98%, 而 LPT 算法识别率为 91.76%。

星图的星点坐标提取过程有时会受到周围环境

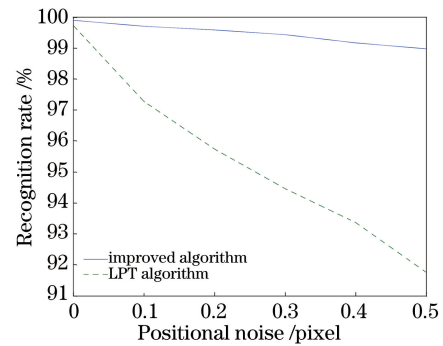


图 3 星图识别率

Fig. 3 Recognition rate of star map

及天体的干扰, 所以常常会导致星点提取的结果和实际的情况存在出入。当星点提取的结果中包含实际不存在的星点时, 称为存在伪星, 当提取的星点少于实际情况时, 称为存在缺星。伪星或者缺星的存在会导致星点提取的结果和实际情况不符, 这就使得构造的星模式和特征向量发生改变, 有可能会造成星图识别的失败。为了考察算法的性能, 删除提取的星点和在星图上加上伪星, 以便得到该种情况下星图的识别率。

图 4 描述了伪星的个数从 1 增加到 3 时, 两种星图识别方法的识别率随位置噪声增加的变化趋势。可以看出: 相较于 LPT 算法, 所提改进算法的识别率要高, 并且在存在伪星的情况下, 随着位置噪声的增加, 星图的识别率下降的趋势要低于 LPT 算法; 当不存在位置噪声时, 伪星从 1 增加到 3, 所提改进算法识别率从 99.84% 下降到 99.72%, 下降了 0.12 个百分点, 下降几乎为零, LPT 算法识别率从 98.47% 下降到 95.42%, 下降了 3.05 个百分点; 当位置噪声为 0.5 pixel 时, 所提改进算法下降了 2.57 个百分点, LPT 算法下降了 2.86 个百分点。由此可以看出, 所提改进算法受到伪星的影响要比 LPT 算法小。

图 5 描述了缺星的个数增加时, 所提改进算法和 LPT 算法的星图识别率随位置噪声的变化情况。从图 5(a)中可以看出, 所提改进算法性能优于 LPT 算法, 主要表现在所提改进算法不仅识别率更高, 并且随着噪声的增加, 识别率的下降趋势越来越低于 LPT 算法。图 5(b)中所提算法下降率和 LPT 算法下降率接近, 但仍略小于 LPT 算法。缺星数从 0 增加到 2, 所提算法的识别率下降 0.12 个百分点, 而 LPT 算法下降 1.43 个百分点。因此, 当缺星数目增加时, 所提算法识别性能要优于 LPT 算法。

星敏感器在实际工作时可能同时受到伪星和缺星的影响。为了考察算法在这种情况下性能, 在

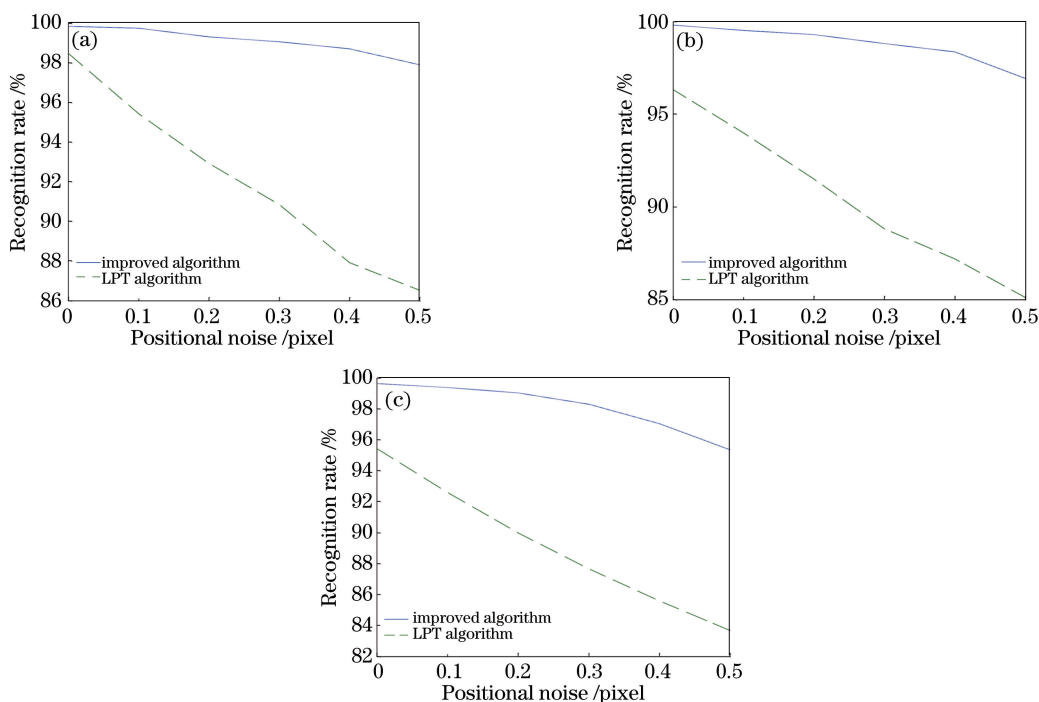


图 4 星图识别率。(a)一颗伪星;(b)二颗伪星;(c)三颗伪星

Fig. 4 Recognition rate of star map. (a) A pseudostar; (b) two pseudostars; (c) three pseudostars

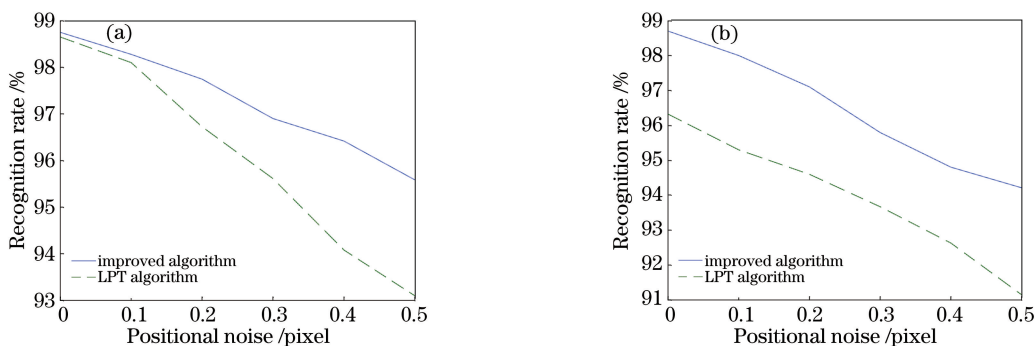


图 5 星图识别率。(a)一颗缺星;(b)二颗缺星

Fig. 5 Recognition rate of star map. (a) A missing star; (b) two missing stars

星图上同时添加位置噪声、伪星和缺星。图 6 显示了位置噪声从 0 pixel 增加到 0.5 pixel, 存在 1 个伪星和 1 个缺星时, 两种算法识别率的变换情况。从图 6 可以看出, 在此条件下, 所提算法仍能正常工作, 并且识别率高于 LPT 算法, 这表明所提改进算法的性能更优。

在提高星图识别率的前提下, 减少星图匹配的时间有助于提高星敏感器输出参数的频率。通过进行 1000 次星图匹配, 计算单次匹配的平均时间, 表 1 统计了改进算法和 LPT 算法完成星图匹配所需要的时间。所提改进算法平均耗时为 6.2 ms, LPT 算法平均耗时 73.8 ms, 约为所提算法识别时间的 12 倍。从最少识别时间来看, 改进算法的识别时间达 10^{-4} 量级, 而 LPT 算法只有 10^{-2} 量级。可以看

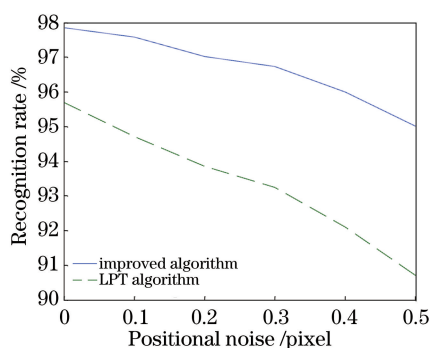


图 6 缺星和伪星同时影响时的星图识别率

Fig. 6 Recognition rate of star map under the influence of both missing star and pseudostar

出, 所提改进算法在星图识别效率方面较 LPT 算法有较大的提高。

表 1 星图识别时间

Table 1 Time of star map recognition

Algorithm	Maximal	Minimal	Average
	time /s	time /s	time /s
LPT algorithm	0.0811	0.0718	0.0738
Improved LPT algorithm	0.0131	7.1050×10^{-4}	0.0062

4 结 论

针对 LPT 算法中两个特征向量匹配时需要的循环平移带来的耗时问题,提出了一种改进算法。仿真实验表明,改进算法受到位置噪声影响时的识别率较 LPT 算法更高,下降率更低,抗干扰能力强,在 0.5 pixel 噪声时的识别率为 98.98%,比 LPT 算法高 7.22 个百分点。受到伪星和缺星共同影响时,改进算法的识别率仍较 LPT 算法高,并且下降率低。改进算法因避免了循环移位匹配,识别耗时更低,平均耗时为 LPT 算法的 8.4%。和 LPT 算法相比,改进算法不仅提高了鲁棒性,减弱了噪声的影响,还提高了算法的识别速度,这将有助于提高星敏感器的刷新频率,提高姿态更新率。

参 考 文 献

- [1] Wu Q, Zhang R. Wavelet denoising of near-earth all-day star map based on local outlier factor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0810001.
吴强, 张锐. 基于局部异常因子的近地全天时星图小波去噪[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0810001.
- [2] Jia Y D, Qiang J, Zhang L, et al. Spaceborne long-distance tracking method based on adaptive vibration suppression[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2212003.
贾远东, 强佳, 张亮, 等. 基于自适应振动抑制的星载远距离测距跟踪方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2212003.
- [3] Gai E, Daly K, Harrison J, et al. Star-sensor-based satellite attitude/attitude rate estimator[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1985, 8(5): 560-565.
- [4] Yang J, Liang B, Zhang T, et al. A novel systematic error compensation algorithm based on least squares support vector regression for star sensor image centroid estimation[J]. Sensors (Basel), 2011, 11(8): 7341-7363.
- [5] Zhang L J, Yang H B, Lu H P, et al. Cubature Kalman filtering for relative spacecraft attitude and position estimation[J]. Acta Astronautica, 2014, 105(1): 254-264.
- [6] Wang Q, Fu Y T. Restoration of smearing stars in fine image stabilization of high-orbit satellites[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1311002.
王奇, 傅雨田. 用于高轨卫星精密稳像的拖尾星斑复原[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1311002.
- [7] Cao Y, Li B Q, Li H T, et al. High-accuracy star sensor centroid algorithm based on star image resampling[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712003.
曹阳, 李保权, 李海涛, 等. 基于星点像重采样的星敏感器高精度质心算法[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712003.
- [8] Jin H, Zhai Z Y, Du W F, et al. Method for experimental analysis of thermostability of star sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0404002.
金荷, 翟正一, 杜伟峰, 等. 星敏感器热稳定性的试验分析方法[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0404002.
- [9] Li X L, Yang J H, Zhang L, et al. A fast all-sky autonomous star pattern identification algorithm[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 37(3): 43-47.
李欣璐, 杨进华, 张刘, 等. 一种快速全天自主星图识别算法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 43-47.
- [10] Guo L L, Zhao Q C, Yang Y, et al. Method for suppression of impulse noise in spaceborne Fourier transform infrared spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0830003.
郭玲玲, 赵其昌, 杨勇, 等. 星载傅里叶变换红外光谱仪的脉冲噪声抑制方法[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0830003.
- [11] Wang H Y, Wang T F, Zhu H Y, et al. Method for determining optimal radius value of defocused image spot of star sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101101.
王海涌, 王腾飞, 朱宏玉, 等. 星敏感器离焦像点半径最优值的确定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 101101.
- [12] Zhang K, Hu B X, Xu X P, et al. A fast correlation matching algorithm based on log-polar transform[J]. Flight Dynamics, 2020, 38(2): 61-65.
张坤, 胡斌星, 许新鹏, 等. 基于对数极坐标变换的快速相关匹配算法[J]. 飞行力学, 2020, 38(2): 61-65.
- [13] Ran H C. Review of image matching based on logarithmic polar coordinates[J]. Modern Computer, 2020(4): 65-69.
冉洪成. 基于对数极坐标的图像匹配综述[J]. 现代计算机, 2020(4): 65-69.

- [14] Wei X G, Zhang G J, Jiang J. Star identification algorithm based on log-polar transform [J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2009, 6(8): 483-490.
- [15] Toloie A, Zahednamazi M, Ghasemi R, et al. A comparative analysis of star identification algorithms [J]. Astrophysics and Space Science, 2020, 365(4): 1-9.
- [16] Li J, Wei X G, Wang G Y, et al. Improved grid algorithm based on star pair pattern and two-dimensional angular distances for full-sky star identification [J]. IEEE Access, 2019, 8: 1010-1020.
- [17] Liu X Y, Zhou Z F, Zhang Z L, et al. Improvement of star identification based on star trace in star images [J]. Measurement, 2017, 105: 158-163.