

采用旋转不变特征的分步星图识别方法

段辉,周召发*,张志利,赵军阳,李新宇,闫兴旭
(火箭军工程大学 导弹工程学院,陕西 西安 710025)

摘要:针对星敏感器的空间迷失问题,提出了一种新的星图识别方法。利用距离映射矢量计算参考星与导航星之间的离散度,以缩短导航星库列表,得到候选导航星,再利用夹角特征矢量与距离特征矢量,通过相似度计算匹配出参考星唯一对应的导航星。通过对仿真星图和真实星图进行性能测试,评估其可行性。结果表明,方法对噪声具有较强的鲁棒性,在位置噪声、伪星和缺失星等恶劣环境的影响下仍能保证93.80%以上的识别率。

关键词:星敏感器;星图识别;星模式;快速匹配

中图分类号:V448.22 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2024)06-054-10



论文
拓展

Stepwise star map identification method using rotation-invariant features

DUAN Hui, ZHOU Zhaofa*, ZHANG Zhili, ZHAO Junyang, LI Xinyu, YAN Xingxu
(College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: A new star map identification method was proposed to solve the problem of space lost of star sensor. The distance mapping vector was used to calculate the dispersion between the reference star and the navigation star, in order to shorten the list of the navigation star database and obtain the candidate navigation star. The angle feature vector and the distance feature vector were used to match the unique corresponding navigation star of the reference star through the similarity calculation. The feasibility of this method was evaluated by the performance test of simulated star map and real star map. The results show that the proposed method is robust to noise and can guarantee the recognition rate of more than 93.80% under the influence of harsh environments such as location noise, pseudo stars and missing stars.

Keywords: star sensor; star map identification; star pattern; quick match

运载体在执行空间任务时需要时刻知道自身的三轴精确指向,因此,高精度地确定运载体姿态历来都是研究热点之一。传统的姿态敏感器有地球敏感器、磁强计、星敏感器等。其中,星敏感器的定姿精度最高,能够很容易地达到角秒级。星敏感器有空间迷失模式和跟踪模式两种,大部分时间星敏感器是处于跟踪模式下。当星敏感器处于空间迷失模式时,首先,需要对星图进行预处理并提取出星点质心坐标;然后,通过星图识别方法确定提取出的星点在导航星表中对应的星号及相关信息;最后,利用恒星在星敏感器坐标系与天球坐标系中的坐标矢量求解姿态。其中,星图识别步骤最为关键。星敏感器实际采集的星图图像

中,时常会伴随伪星、缺失星和位置噪声等问题,这些问题是任何星图识别方法都无法避免的。因此,想要将星图中星点可靠、快速地识别出来,是一项很有挑战性的任务。

现有的恒星识别方法主要从几何角度和模式识别角度出发解决问题。基于几何的方法中最经典的就是 Liebe 等^[1]提出的三角形方法,利用三颗星两两之间的角距作为特征构建导航星库,思想简单但对位置噪声较为敏感、计算效率低下,且特征之间区分度不大,在识别时冗余匹配的情况经常出现。后来,为解决三角形方法的冗余匹配问题,Mortari 等^[2]提出了金字塔方法,以四颗星为一个组合构造特征。Silani 等^[3]提出 Polestar

收稿日期:2022-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075541);陕西省自然科学基金资助项目(2022JM-243)

第一作者:段辉(1996—),男,四川德阳人,博士研究生,E-mail:1020423896@qq.com

*通信作者:周召发(1973—),男,重庆人,教授,博士,博士生导师,E-mail:3199148797@qq.com

引用格式:段辉,周召发,张志利,等.采用旋转不变特征的分步星图识别方法[J].国防科技大学学报,2024,46(6):54-63.

Citation: DUAN H, ZHOU Z F, ZHANG Z L, et al. Stepwise star map identification method using rotation-invariant features[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(6): 54-63.

方法,该方法仍以角距作为特征。在选定参考星后,挑选出某一半径内所有邻星,并得到这些邻星与参考星之间的角距,接着以某种映射方式得到二进制矢量并通过投票的思想在导航星库中进行匹配识别。张广军等^[4]提出改进的三角形方法,以星对角距为特征构建导航星库并进行匹配识别,解决了原始方法执行效率低的问题。刘先一等^[5]通过构建的坐标转换模型对视场范围内的恒星进行坐标转换,将转换后的星点坐标与提取的星点图像坐标进行匹配完成星图的识别,提高了星图识别的快速性。

基于模式识别的方法中以栅格方法^[6]最具代表性。该方法首先需要选定参考星,每个参考星的星模式都不同,据此可以通过划分栅格构造一个区分度很高的模式编码。按照特定的方法依次比对采集星图中构造的模式编码与导航星库中存储的模式编码,匹配度最高的导航星即为最终结果。该方法提供了一种崭新的思想,并在此基础上涌现出了一大批新的基于模式识别的星图识别方法。Zhang等^[7]将星图识别过程分为两个步骤,先利用参考星与邻星间的径向距离特征初始匹配,缩小搜索范围,再利用环向特征匹配参考星唯一对应的导航星。Lee等^[8]开发了改进的栅格方法,将传统的笛卡儿坐标系替换为极坐标系并构造极坐标栅格,提高了现有栅格方法的鲁棒性。Na等^[9]将优化问题中的最小损失函数思想引入到星图识别中,以最小损失函数来衡量参考星模式与导航星模式之间的差异。而且,在识别过程中添加了新的星等特征,并将其作为损失函数的权重,使得算法更加合理,鲁棒性更强。张刘等^[10]通过动态半径调节保证伴星落在每个圆环的概率相等,使得径向匹配过程的识别率进一步提升。胡坤等^[11]基于星间角距建立了每一颗导航星的旋转无关特征,并引入 Hausdorff 距离以实现恒星筛选。王华超等^[12]将模糊决策理论与星图识别融合,该方法的提出使得程序在处理过程中能够兼具实时性与星表匹配的准确性。王泽文等^[13]所提算法对星敏感器的旋转方向和焦距等变化不敏感,采用基于 L2 范数对应的相对欧氏距离作为集合元素,解决星敏感器滚动对星图识别的影响。王军等^[14]提出了一种基于多特征匹配的识别算法,通过构造观测三角形,基于观测三角形的特征快速定位特征库子块,并通过多特征匹配的方法得到观测三角形的识别结果,进而识别出视场中其他导航星。

本文方法以最靠近图像中心的恒星作为参考

星。首先,利用参考星及其邻星的夹角特征和距离特征构造夹角特征矢量、距离特征矢量和距离映射矢量。其次,基于距离映射矢量计算参考星与导航星之间的离散度,缩短导航星库列表,得到候选导航星。接着,利用夹角、距离信息对搜索参考星夹角特征矢量与候选导航星夹角特征矢量的对应起始边并循环移位。最后,基于夹角特征矢量构造累积夹角特征矢量,并计算参考星与符合条件的导航星之间的相似度,最终得到相似度最高的星即为正确的导航星,算法的流程示意图如图 1 所示。

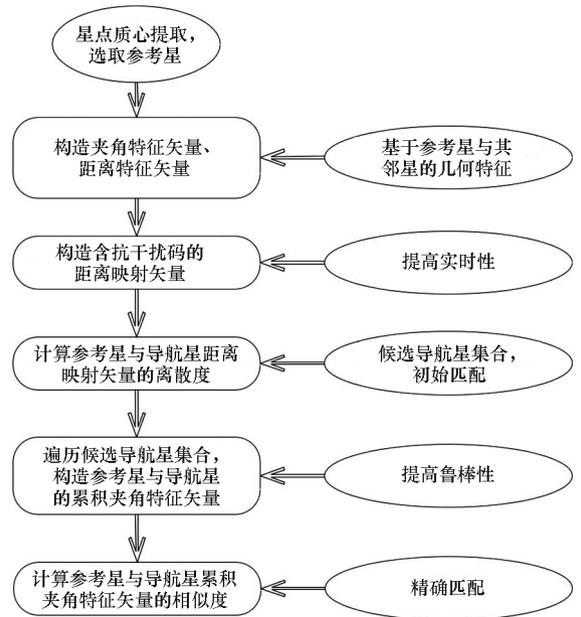


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow

1 特征提取与导航星库构建

1.1 特征提取

本文方法采用了两种旋转和平移不变的特征——邻星与中心导航星的径向距离 D_i ^[15-16]、连续相邻恒星与中心导航星构成的相对角 Φ_i ^[17],并基于这两种特征构造每颗导航星的星模式,如图 2 所示。令每颗导航星处在视场的中心,并考虑所有位于半径 R 内的邻星来提取上述两个特征,邻星按照逆时针的顺序分别记为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ 。 R 与星敏视场角 F 之间的关系^[18]为:

$$F = 2\arctan\left(\frac{R\rho}{f}\right) \quad (1)$$

式中, f 为焦距, ρ 为像素尺寸, 半径 R 为距离中心的最大距离。

所提取的两个特征计算^[19]如下:

$$\Phi_i = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_{i+1} - y_c}{x_{i+1} - x_c}\right) - \arctan\left(\frac{y_i - y_c}{x_i - x_c}\right) & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ 360^\circ - \arctan\left(\frac{y_N - y_c}{x_N - x_c}\right) + \arctan\left(\frac{y_1 - y_c}{x_1 - x_c}\right) & i = N \end{cases} \quad (2)$$

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中, x_i 和 y_i 分别为第 i 个邻星在图像坐标系中的坐标, N 是视场中所有邻星的总数目, x_c 和 y_c 为导航星在图像坐标系中的坐标。

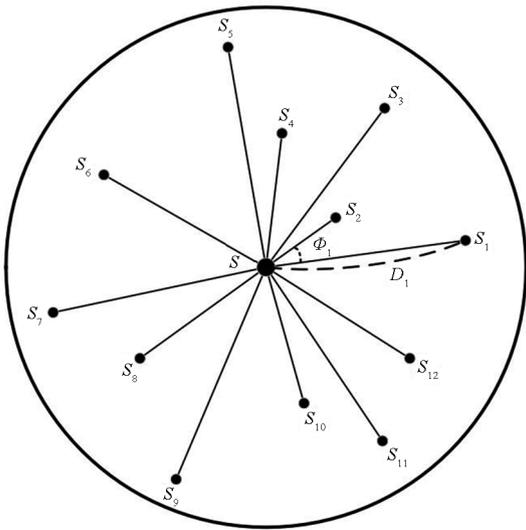


图 2 导航星模式示意图

Fig. 2 Navigation star mode diagram

1.2 导航星库构建

导航星库中, 每颗导航星分别有夹角特征矢量 Φ 、距离特征矢量 D 和距离映射矢量 A 。利用各个邻星与导航星在图像坐标系中的位置坐标, 再结合 Φ_i 和 D_i 的表达式可以求得导航星与邻星之间的夹角特征矢量 $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N)$ 以及距离特征矢量 $D = (D_1, D_2, \dots, D_N)$ 。上述特征统一按照逆时针的方式进行排列, 而起始边 D_i 选取的不同, 对应到夹角特征矢量 Φ 和距离特征矢量 D 上只是进行了循环移位, 并不影响矢量的本质特征, 以 D_{\min} 为起始边构造 D 与 Φ , 其中, $D_{\min} = \min\{D_1, D_2, \dots, D_N\}$, 选择哪条边作为起始边并不影响。

此外, 还需要构造导航星的距离映射矢量 A , 用于缩短导航星库列表, 得到候选导航星。这是星图识别的第一步, 有了候选导航星, 后续便可利用夹角特征矢量 Φ 和距离特征矢量 D 识别出参

考星唯一对应的导航星。

前面已得到导航星和邻星之间的距离特征矢量 $D = (D_1, D_2, \dots, D_N)$, 下面通过距离特征矢量 D 计算导航星距离映射矢量 A 。导航星与邻星间的径向距离 D_i 最大为 R , 距离映射矢量是一个 N_D 维矢量信号, N_D 值由式(4)给出, 其中 k 值由实验测试确定。矢量中每一位的取值为 0 或者 1, 具体取值方法如下。首先令 N_D 维距离特征矢量全为 0, 将 D_1 代入式(5), 得到 T_1 , 则距离映射矢量的第 T_1 位置置 1。依次遍历距离特征矢量 D 中的 $D_i (i \in \{1, \dots, N\})$, 即得 N_D 维导航星距离映射矢量 $A = (A_1, A_2, \dots, A_{N_D})$ 。

$$N_D = 2^k \quad k \in \mathbf{Z} \quad (4)$$

$$T_i = \text{fix}\left(\frac{D_i}{R} \times N_D\right) + 1 \quad T_i \in \{1, 2, \dots, N_D\} \quad (5)$$

式中, fix 函数表示向下取整。

2 星图识别

2.1 候选导航星筛选

对于星敏传感器拍摄的星图而言, 在星点质心定位过程完成之后, 选定距离图像中心最近的星点作为参考星, 仍然利用式(2)~(3)提取出参考星和邻星之间的夹角特征矢量 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$ 以及距离特征矢量 $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)$, 然后按照式(5)构建 N_D 维参考星距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 。下面, 基于距离映射矢量 λ 缩短导航星库中的恒星列表, 筛选出符合条件的候选导航星。利用图像信号求解星点的二维质心坐标时, 会面临杂散光、仪器噪声、质心算法精度低等问题, 使得质心坐标存在一定偏差, 进而导致参考星与邻星间的径向距离 d_i 产生偏差, T_i 值计算不准确。为提高本文方法的抗噪性能, 在计算 T_i 值时, 若 $d_i/(R/N_D)$ 满足式(6)~(7)的条件, 则说明该 T_i 值很容易受到噪声影响, 需在距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 中添加抗干扰码, ζ_1 为抗干扰码阈值。即满足式(6)的径向距离 d_i , 在第 T_i 位和第 $T_i + 1$ 位都置 1, 满足式(7)的径向距离 d_i , 在第 T_i 位和第 $T_i - 1$ 位都置 1。如此, 在后续对参考星与导航星的距离映射矢量 λ 、 A 做离散度计算时, 成功匹配率更高。抗干扰码可在一定程度上降低对位置噪声的敏感性。

$$\frac{d_i}{R/N_D} \geq T_i - \zeta_1 \quad (6)$$

$$\frac{d_i}{R/N_D} \leq (T_i - 1) + \zeta_1 \quad (7)$$

接着,计算参考星距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 与导航星距离映射矢量 $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{N_D})$ 之间的离散度 X 。首先将 λ 与 Λ 对应位置的运算做“与”运算并累加求和得到 B 值, B 值代表参考星与该颗导航星能够匹配上的邻星数量。再用该颗导航星的邻星数量之和减去 B 值,即可得到离散度 X 。具体计算公式如下:

$$\begin{cases} B = \sum_{i=1}^{N_D} (\lambda_i \& \Lambda_i) \\ X = \sum_{i=1}^{N_D} \lambda_i - B \end{cases} \quad (8)$$

式中,“&”表示“与”运算。

导航星的离散度 X 越小,代表参考星与该导航星越匹配,该导航星是待识别导航星的可能性越大。设参考星的邻星数量为 m ,将离散度 X 小于等于 $fix(m/3) + 1$ 的导航星确定为候选导航星,这样能保证参考星与候选导航星匹配上的径向距离数至少在 $2/3$,如下式所示:

$$X \leq fix(m/3) + 1 \quad (9)$$

2.2 参考星识别

有了候选导航星,便可基于参考星的夹角特征矢量 φ 以及距离特征矢量 d 来识别出唯一对应的导航星,具体思路如下。其中, $D = (D_1, D_2, \dots, D_n)$ 、 $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)$ 为导航星的距离特征矢量和夹角特征矢量, $d = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ 、 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$ 为参考星的距离特征矢量和夹角特征矢量, n 和 m 分别为导航星和参考星的邻星数量。由于星敏传感器拍摄星图时旋转角的随机性,参考星和导航星构造特征矢量的起始边不一致。以图2中导航星的星模式为例,若 S_1 为起始边,则导航星的距离特征矢量 D 、夹角特征矢量 Φ 如下所示:

$$\begin{cases} D = (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8, D_9, D_{10}, D_{11}, D_{12}) \\ \Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_8, \Phi_9, \Phi_{10}, \Phi_{11}, \Phi_{12}) \\ \{D, \Phi\} = \{(D_1, \Phi_1), (D_2, \Phi_2), (D_3, \Phi_3), (D_4, \Phi_4), \\ (D_5, \Phi_5), (D_6, \Phi_6), (D_7, \Phi_7), (D_8, \Phi_8), \\ (D_9, \Phi_9), (D_{10}, \Phi_{10}), (D_{11}, \Phi_{11}), (D_{12}, \Phi_{12})\} \end{cases} \quad (10)$$

以图3为例,任取一边,例如以 S_5 为起始边,则参考星的 d, φ 如下所示:

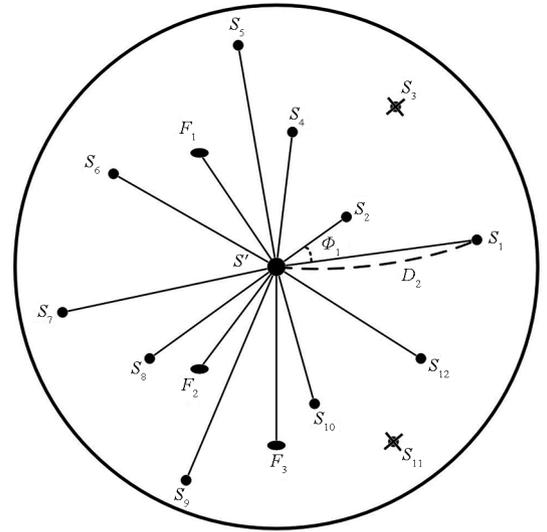


图3 参考星模式示意图

Fig. 3 Reference star mode diagram

$$\begin{cases} d = (d_5, d_{F_1}, d_6, d_7, d_8, d_{F_2}, d_9, d_{F_3}, d_{10}, d_{12}, d_1, d_2, d_4) \\ \varphi = (\varphi_5 - \varphi_{F_1}, \varphi_{F_1}, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8 - \varphi_{F_2}, \varphi_{F_2}, \varphi_9 - \\ \varphi_{F_3}, \varphi_{F_3}, \varphi_{10} + \varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_1, \varphi_2 + \varphi_3, \varphi_4) \\ \{d, \varphi\} = \{(d_5, \varphi_5 - \varphi_{F_1}), (d_{F_1}, \varphi_{F_1}), (d_6, \varphi_6), (d_7, \varphi_7), \\ (d_8, \varphi_8 - \varphi_{F_2}), (d_{F_2}, \varphi_{F_2}), (d_9, \varphi_9 - \varphi_{F_3}), \\ (d_{F_3}, \varphi_{F_3}), (d_{10}, \varphi_{10} + \varphi_{11}), (d_{12}, \varphi_{12}), \\ (d_1, \varphi_1), (d_2, \varphi_2 + \varphi_3), (d_4, \varphi_4)\} \end{cases} \quad (11)$$

为了后续能够得到正确的参考星、导航星累积夹角特征矢量 ε, E ,并计算二者之间的相似度 P ,必须保证导航星与参考星的夹角特征矢量 Φ, φ 是从同一起始边开始构造的,即矢量 Φ, φ 中的第一位与矢量 D, d 中的第一位都相等。由式(10)、式(11)中 $\{D, \Phi\}, \{d, \varphi\}$ 容易观察到,实拍星图中存在伪星和缺失星的问题,单独凭借某个夹角特征 Φ_i, φ_i 或者某个距离特征 D_i, d_i 去寻找某一对应起始边时容易出错,而一旦起始夹角匹配错误,则后续会构造出完全不一样的累积夹角特征矢量,进而导致识别失败。

例如,单独凭借夹角特征来寻找对应起始边、起始夹角时, φ 中下列任一元素 $\varphi_5 - \varphi_{F_1}$ 、 φ_{F_1} 、 $\varphi_8 - \varphi_{F_2}$ 、 φ_{F_2} 、 $\varphi_9 - \varphi_{F_3}$ 、 φ_{F_3} 、 $\varphi_{10} + \varphi_{11}$ 、 $\varphi_2 + \varphi_3$ 与 Φ 中任一元素 $\Phi_1 \sim \Phi_{12}$ 存在相等值,以 $\varphi_{F_1} = \Phi_5$ 为例来说明, Φ_5 处于 Φ 中第5位, φ_{F_1} 处于 φ 中第2位,将 Φ 向左循环移4位、 φ 向左循环移1位得:

$$\begin{cases} \Phi' = (\Phi_5, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_8, \Phi_9, \Phi_{10}, \Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_1, \Phi_2, \\ \quad \Phi_3, \Phi_4) \\ \varphi' = (\varphi_{F_1}, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8 - \varphi_{F_2}, \varphi_{F_2}, \varphi_9 - \varphi_{F_3}, \varphi_{F_3}, \\ \quad \varphi_{10} + \varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_1, \varphi_2 + \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5 - \varphi_{F_1}) \end{cases} \quad (12)$$

求出 Φ' 、 φ' 的累积夹角特征矢量 E 、 ε ，如式(13)所示，并计算相似度 P (具体方法见后文)，可得 $P=0$ ，即图 3 中参考星与它在导航星库中正确匹配的导航星之间的相似度为 0，这必然导致最终识别结果错误。此处也可看出，仅仅因为起始夹角匹配错误，将会直接导致参考星与其对应的导航星识别失败。

$$\begin{cases} E = (\Phi_5, \Phi_5 + \Phi_6, \Phi_5 + \Phi_6 + \Phi_7, \Phi_5 + \Phi_6 + \Phi_7 + \\ \quad \Phi_8, \Phi_5 + \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 + \Phi_9, \dots) \\ \varepsilon = (\varphi_{F_1}, \varphi_{F_1} + \varphi_6, \varphi_{F_1} + \varphi_6 + \varphi_7, \varphi_{F_1} + \varphi_6 + \\ \quad \varphi_7 + \varphi_8 - \varphi_{F_2}, \varphi_{F_1} + \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8, \dots) \end{cases} \quad (13)$$

因此，为提高算法的鲁棒性，应以参考星的某一个距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 为基础，依次遍历所有候选导航星的夹角特征矢量 Φ 与距离特征矢量 D ，筛选出包含 (d_i, φ_i) 的导航星，并进行下一步累积夹角特征矢量与相似度的计算，通过相似度的值识别出正确的导航星。此外，实拍星图在星点质心定位时，会面临杂散光、仪器噪声、质心算法精度低等问题，使得距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 存在一定的误差，因此在遍历过程中只要某导航星的 (D_j, Φ_j) 满足式(14)的约束，即符合匹配条件，可以进行后续相似度的计算。

$$\begin{cases} |d_i - D_j| \leq \zeta_2 \\ |\varphi_i - \Phi_j| \leq \zeta_3 \end{cases} \quad (14)$$

式中， d_i 为参考星第 i 个距离特征， D_j 为导航星第 j 个距离特征， φ_i 为参考星第 i 个夹角特征， Φ_j 为导航星第 j 个夹角特征， ζ_2 为距离阈值， ζ_3 为夹角阈值。

仍以图 2、图 3 为例，基于参考星特征中的 (d_6, φ_6) 来说明这一过程。此时，夹角特征矢量 Φ 、 φ 中都包含 (d_6, φ_6) ， Φ_6 处于 Φ 中第 6 位， φ_6 处于 φ 中第 3 位，将 Φ 向左循环移 5 位、 φ 向左循环移 2 位得：

$$\begin{cases} \Phi' = (\Phi_6, \Phi_7, \Phi_8, \Phi_9, \Phi_{10}, \Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5) \\ \varphi' = (\varphi_6, \varphi_7, \varphi_8 - \varphi_{F_2}, \varphi_{F_2}, \varphi_9 - \varphi_{F_3}, \varphi_{F_3}, \varphi_{10} + \\ \quad \varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_1, \varphi_2 + \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5 - \varphi_{F_1}, \varphi_{F_1}) \end{cases} \quad (15)$$

求出 Φ' 、 φ' 的累积夹角特征矢量 E 、 ε ，如式(16)所示，并计算相似度 P ，可得 $P=10$ 。可以

看出，在实拍星图存在两颗缺失星、三颗伪星的恶劣环境下，只要夹角特征矢量 Φ 、 φ 的起始位置匹配正确，参考星与其对应的正确导航星之间仍然能够得到非常好的匹配效果，而与其余非正确导航星的相似度会非常低。针对实拍星图中缺失星和伪星的问题，本文方法具有很强的鲁棒性。

$$\begin{cases} E = (\Phi_6, \Phi_6 + \Phi_7, \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8, \\ \quad \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 + \Phi_9, \dots) \\ \varepsilon = (\varphi_6, \varphi_6 + \varphi_7, \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8 - \varphi_{F_2}, \varphi_6 + \\ \quad \varphi_7 + \varphi_8, \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8 + \varphi_9 - \varphi_{F_3}, \dots) \end{cases} \quad (16)$$

一般而言，满足式(14)约束的所有导航星中，与参考星相似度 P 最大者即为正确导航星。但少数情况下，最大 P 值仍然非常小，小于了某个相似度阈值，或者在候选导航星中没有匹配上的导航星，这说明先前选取的距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 有误，应重新选取一个距离、夹角信息对 (d_j, φ_j) 与候选导航星重新匹配并计算相似度 P ，以识别出正确的导航星。

下面说明参考星与导航星的夹角特征矢量 φ 、 Φ 在对齐起始边(起始夹角)后，如何计算二者之间的相似度(下文 φ 、 Φ 看成是已经对齐了起始边)。分别利用参考星和导航星的夹角特征矢量 φ 、 Φ 构造各自的累积夹角特征矢量 $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m\}$ 和 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ ，其中各个元素分别定义为：

$$\begin{cases} \varepsilon_j = \sum_{i=1}^j \varphi_i \quad j \in \{1, 2, \dots, m\} \\ E_j = \sum_{i=1}^j \Phi_i \quad j \in \{1, 2, \dots, n\} \end{cases} \quad (17)$$

计算累积夹角特征矢量 ε 与 E 之间的相似度 P ， P 的初值置 0，计算方法如下。

Step 1: ε_i 和 E_j 中，下标 i, j 分别从 1 开始计数，即 $i=j=1$ 。

Step 2: ε_i 对 E_j 遍历(j 从 1 到 n)，若 ε_i 与 E_k ($k \in \{1, \dots, n\}$) 接近，即满足累积夹角约束式(18)，则认为 ε_i 与 E_k 匹配，相似度 $P=1$ ，且令 $i=i+1=2, j=k+1, \varepsilon_2$ 对 E_j 遍历(j 从 $k+1$ 到 n)， ζ_4 为累计夹角阈值。

$$|\varepsilon_i - E_j| \leq \zeta_4 \quad (18)$$

Step 3: 若 ε_i 与 $E_1 \sim E_n$ 都不匹配，则令 $i=i+1=2, j=1$ ，令 ε_2 对 E_j 遍历(j 从 1 到 n)，并进行 Step 2 相同操作。

Step 4: 当满足 $i > m$ 或者 $j > n$ 时，累积夹角特征矢量匹配结束，此时的相似度 P 表示待识别参考星与某颗候选导航星之间累积夹角特征矢量匹配成功的对数。

为便于直观理解,仍以图 2、3 为例,给出具体的夹角值(忽略噪声),导航星 S 的夹角特征矢量 $\Phi = (23, 10, 32, 25, 50, 40, 25, 30, 35, 10, 30, 50)$, 累积夹角特征矢量 $E = (23, 33, 65, 90, 140, 180, 205, 235, 270, 280, 310, 360)$; 参考星 S' 的夹角特征矢量 $\varphi = (23, 42, 25, 25, 25, 40, 25, 17, 13, 20, 15, 40, 50)$, 累积夹角特征矢量 $\varepsilon = (23, 65, 90, 115, 140, 180, 205, 222, 235, 255, 270, 310, 360)$ 。按照步骤 1~4 计算累积夹角特征矢量 ε 与 E 之间的相似度 P , 可得 $P = 10$, 图 4 中具体标注了累积夹角特征矢量 ε 和 E 之间的匹配情况。

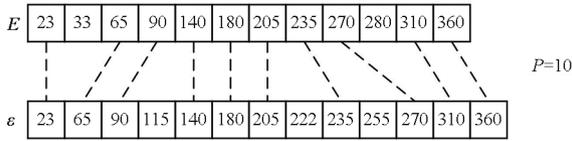


图 4 本文方法匹配示意图

Fig. 4 Matching diagram of the proposed method

此外,若不采用上述先将夹角特征矢量 φ 、 Φ 循环移位对齐,再通过求累积夹角特征矢量 ε 与 E , 计算相似度 P 的方法,转而采用直接将夹角特征矢量 φ 、 Φ 按从小到大排列,计算 φ 、 Φ 相似度的方法,则排序后导航星 S 的夹角特征矢量 $\Phi = (10, 10, 23, 25, 25, 30, 30, 32, 35, 40, 50, 50)$, 参考星 S' 的夹角特征矢量 $\varphi = (13, 15, 17, 20, 23, 25, 25, 25, 25, 40, 40, 42, 50)$ 。按照步骤 1~4 计算 φ 、 Φ 之间的相似度 P , 可得 $P = 5$, 具体的匹配情况如图 5 所示。容易看出,本文方法的识别能力更具优势,匹配能力更强,鲁棒性更强。

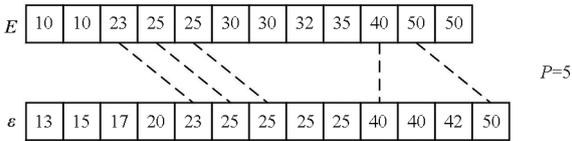


图 5 升序排列匹配示意图

Fig. 5 Ascending sorting matching diagram

综上所述,本文方法的执行步骤如下。

- 1) 利用星点提取得到的星点质心坐标找出距离中心最近的星确定为参考星。
- 2) 计算参考星与每一个邻星之间的距离特征与夹角特征,并构成夹角特征矢量 φ 、距离特征矢量 d 。
- 3) 在距离特征矢量 d 的基础上,计算得到含抗干扰码的距离映射矢量 λ 。
- 4) 利用式(8)计算参考星距离映射矢量 λ 与导航星距离映射矢量 Λ 之间的离散度 X , 最终得到候选导航星。

5) 在导航星的距离特征矢量 D 与夹角特征矢量 Φ 中搜索是否包含参考星的距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) , 若包含,则找到起始边,对参考星与导航星的夹角特征矢量 φ 、 Φ 循环移位,得到各自新的夹角特征矢量 φ' 、 Φ' ; 若不包含,则剔除该导航星,搜索下一颗导航星。

6) 计算夹角特征矢量 φ' 、 Φ' 的累积夹角特征矢量 ε 、 E , 并求出参考星与导航星之间的相似度 P , 相似度 P 最大者即为正确的导航星。

3 仿真与实验

3.1 仿真实验分析

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,若星等增大,则导航星库数目呈指数增加,会增加星图匹配时间;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^[20]。因此,选取 SAO J2000 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。首先,利用仿真星图对各识别方法性能进行测试,并选取一些具有代表性的星图识别方法作为对比对象。其次,为了使仿真星图更加接近于实际星图,在仿真过程中分别加入位置噪声、伪星以及星等噪声等,以分析不同算法的性能表现^[21-26]。最后,使用星敏感器拍摄的真实星图进行测试,验证该方法的可用性。本仿真使用 MATLAB 2018b 数值计算软件在笔记本电脑上进行,系统配置为 Inter i7 - 8550U 2.0GHz CPU, 32GB RAM。星敏感器的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameter

参数	数值
视场角	12° × 12°
焦距/mm	50
分辨率/像素	1 024 × 1 024
像元尺寸/μm	13
极限星等	6

为了验证本文方法在不同环境下的各项性能指标,首先随机生成 10 000 幅理想仿真星图开展仿真实验,然后在 10 000 幅理想仿真星图中分别添加不同强度的位置噪声、星等噪声和不同数量的伪星进行性能测试,以验证本文方法的可靠性

和鲁棒性。测试中,选择栅格方法、对数极坐标变换方法(后文简称对数方法)和三角形方法(后文简称三角方法)作为对比。

在理想情况下,仿真图像中不存在位置噪声、星等噪声和伪星。表 2 总结了四种方法在理想情况下的性能。

表 2 理想情况下的算法性能

Tab. 2 Algorithm performance in the ideal case

方法	识别率/%	平均耗时/ms
栅格方法	99.27	1.67
对数方法	99.34	2.59
三角方法	93.04	11.54
本文方法	99.57	2.21

表 2 中的结果表明,本文方法在识别精度上优于其余三种方法,平均耗时也保持在一个较好的水平,只比栅格方法略微差一些。这主要得益于本文方法的距离映射矢量搜索策略能快速缩短导航星库范围,得到候选导航星。下面通过在仿真图像中添加位置噪声、星等噪声和伪星测试本文方法的鲁棒性。

求解星点在像平面上的质心坐标时,会存在杂散光、仪器噪声、质心算法精度低等问题,使得质心坐标与真实值之间存在一定偏差。此外,运载体在某些工况下通常会存在角速度变化,使得曝光时间内拍摄的图像产生拖尾,信噪比降低,质心坐标的偏差更大。因此,在仿真图像中添加星点位置偏差以逼近真实情况。仿真中位置偏差设为 0 均值、0.1 ~ 1.0 像素标准差的高斯白噪声,步长设为 0.1 像素。位置噪声标准差逐步增大时,不同方法的性能表现如图 6 所示。

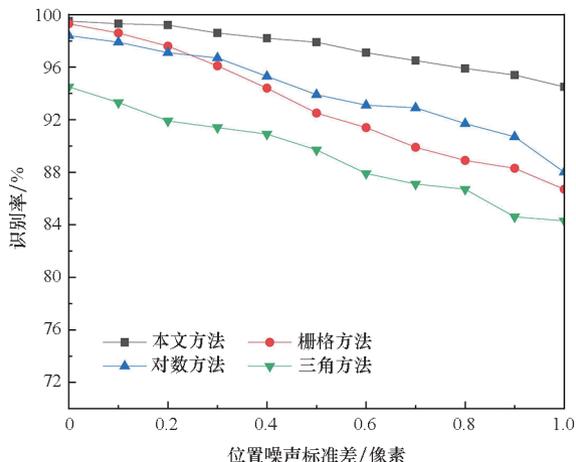


图 6 添加位置噪声下的算法性能

Fig. 6 Algorithm performance with location noise

不同的识别方法,对恒星位置偏差的敏感度不同。从图 6 可以看出,在星图图像受到位置噪声影响时,本文方法相较于其余三种方法仍具有明显的优势。即使位置噪声标准差高达 1.0 个像素,本文方法的识别率仍能稳定地保持在 93.80% 以上,且识别率的下降趋势最平缓。而其他方法的识别率都在 90.00% 以下,尤其是三角方法,其依赖的角距特征会受到较大影响而容易导致识别失败。本文方法通过将径向距离特征映射到高维矢量上得到距离映射矢量,再加上抗干扰码的辅助,在一定程度上降低了本文方法对位置噪声的敏感度。因此,该技术得以将识别率保持在 93.80% 以上。

在星敏器实际工作时,弱星由于能量分布较弱,有时候不容易被检测出来而产生缺失星,仿真时通过引入星等偏差来模拟该情形。仿真中星等偏差量为 0 均值、0.1 ~ 1.0 像素标准差的高斯白噪声,步长设为 0.2 像素。例如,星图中星等为 5.8 的恒星,若其星等偏差为 +0.3,则该恒星为缺失星,将不会出现在仿真星图中(正常的星等阈值为 6.0)。星等噪声标准差逐步增大时,不同方法的性能表现如图 7 所示。此外,为了更好体现不同算法的综合性能表现情况,在每一幅模拟星图的随机位置处添加 2 颗伪星,以便得到该种情况下星图的识别率随星等噪声标准差增加的变化趋势。

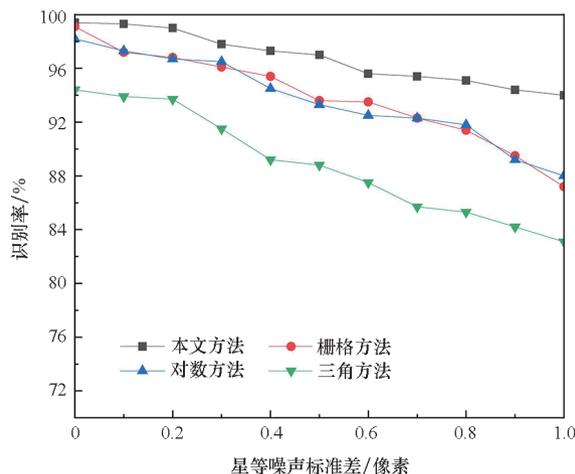


图 7 添加星等噪声下的算法性能

Fig. 7 Algorithm performance with magnitude noise

如图 7 所示,在这种情况下,随着星等噪声标准差的增加,四种方法的下降趋势相差不大,但本文方法的识别率始终高于另外三种方法。通过匹配夹角特征矢量的对应起始边,并在循环移位后进行相似度计算,使得本文方法在存在多颗缺失星以及伪星时仍能以很高的准确度 (>95.00%)

识别出对应的导航星。

星传感器对天区进行拍摄的过程中,容易有灰尘、污渍等附着在光学镜头上,或者存在太空碎片等干扰使得星图中容易出现伪星,这是星图识别过程中容易出现的问题之一。图像中存在的伪星数量一般在 1 到 5 颗。因此,在仿真图像中分别添加 1 到 5 颗具有随机位置的伪星。伪星数量逐步增加时,不同方法的性能表现如图 8 所示。

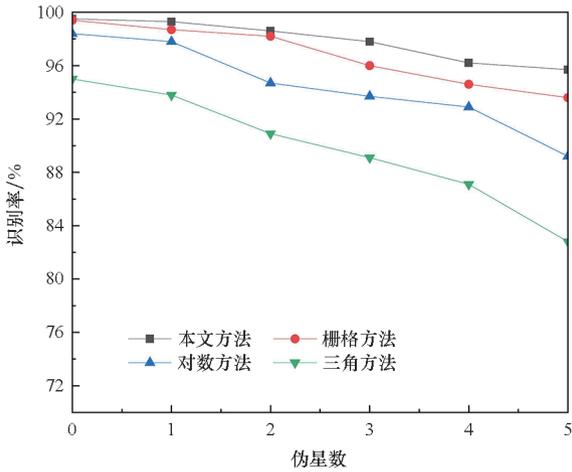


图 8 添加伪星下的算法性能

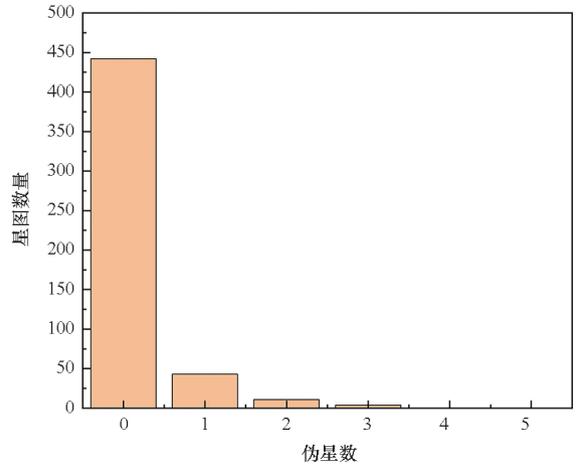
Fig. 8 Algorithm performance with pseudo stars

从图 8 可以看出,随着伪星数量的增加,三角方法的识别率下降幅度最大,受影响最大;其次是对数方法与栅格方法,而本文方法的识别率变化最平稳,在存在 5 颗伪星的恶劣条件下仍然能够保持在一个较高的水平。在存在伪星时,本文方法识别率高的原因与存在缺失星时识别率较高的原因相同,简单来说,就是在存在多颗缺失星与伪星的条件下,本文方法依旧能够保证参考星与导航星具有较高的相似度 P ,具体可参考图 4 的解释。

3.2 真实星图实验分析

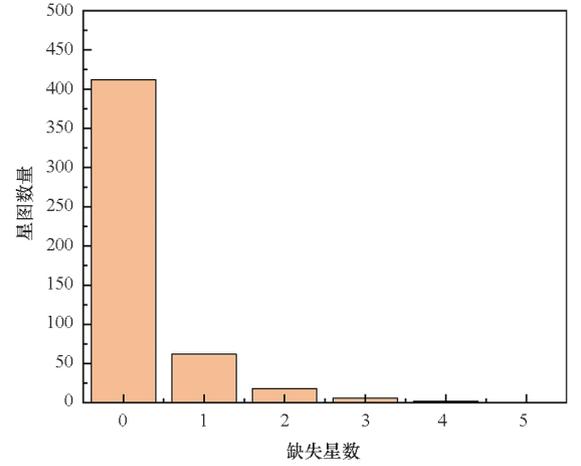
使用实验室自研星传感器在天气较好时拍摄得到 500 幅真实星图,嵌入式设备型号为 DSP6748,星传感器的视场角为 $12^\circ \times 12^\circ$,焦距为 50 mm,分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$ 像素,像元尺寸为 $13\ \mu\text{m}$,极限星等为 6。500 幅真实星图中,伪星和缺失星数量分布如图 9 所示。

较好天气下真实星图的算法性能如表 3 所示。可知,四种方法的性能表现在真实运用场景下都有不同程度的下降,但本文方法在识别率上仍然保持最高,相比对数方法高出了 1.33%,500 幅星图的平均耗时为 47.52 ms,能



(a) 伪星数

(a) The number of pseudo stars



(b) 缺失星数

(b) The number of missing stars

图 9 较好天气下伪星和缺失星的数量

Fig. 9 The number of pseudo stars and missing stars in good weather

够满足工程上的需要。

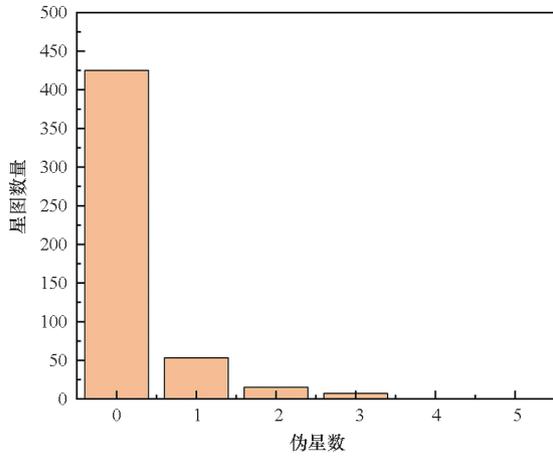
表 3 较好天气下真实星图的算法性能

Tab. 3 Algorithm performance with real star map in good weather

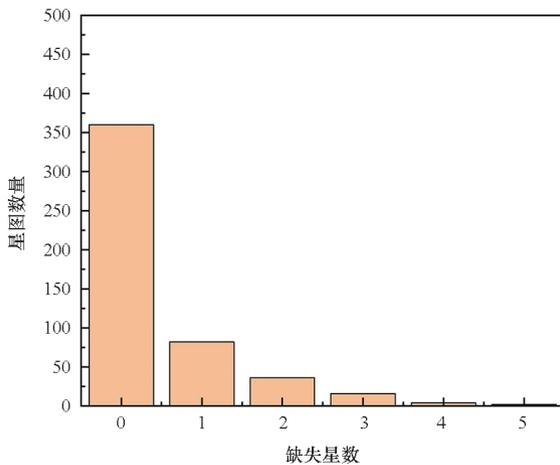
方法	识别率/%	平均耗时/ms
对数方法	93.19	82.82
栅格方法	92.96	42.76
三角方法	90.85	181.39
本文方法	94.52	47.52

使用同型号星传感器在天气较差时拍摄得到 500 幅真实星图,其中伪星和缺失星数量分布如图 10 所示。

较差天气下真实星图的算法性能如表 4 所示。容易看出,四种方法的性能表现都出现了大



(a) 伪星数
(a) The number of pseudo stars



(b) 缺失星数
(b) The number of missing stars

图 10 较差天气下伪星和缺失星的数量

Fig. 10 The number of false stars and missing stars in poor weather

幅度下降,但相较于其余三种方法,本文方法依旧有着较高的识别率,相对对数方法高出了 3.72%,500 幅星图的平均耗时为 51.97 ms,能够满足工程上的需要。且真实星图实验结果与仿真星图实验结果基本一致,进一步验证了本文方法的可靠性与鲁棒性。

表 4 较差天气下真实星图的算法性能

Tab. 4 Algorithm performance with real star map in poor weather

方法	识别率/%	平均耗时/ms
对数方法	84.46	85.13
栅格方法	81.58	39.23
三角方法	82.37	231.53
本文方法	88.18	51.97

4 结论

本文针对运载体的空间迷失状态,提出了一种全天区星图识别方法。首先,利用采集图像中提取的特征构造夹角特征矢量、距离特征矢量和含抗干扰码的距离映射矢量。其次,基于距离映射矢量计算导航星与参考星的离散度,得到候选导航星。接着,利用距离、夹角信息对在候选导航星中进行匹配,匹配上之后对夹角特征矢量循环移位并得到累积夹角特征矢量。最后,求解出参考星与导航星之间的相似度,相似度最大者即为正确的导航星。仿真与真实星图实验结果表明,与其余三种方法相比,本文方法对噪声的敏感度更弱,有着更好的鲁棒性,且在具有可靠识别率的同时,计算效率也能保持在一个较好的水平。

参考文献 (References)

- [1] LIEBE C C. Pattern recognition of star constellations for spacecraft applications [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1993, 8(1): 31-39.
- [2] MORTARI D, SAMAAN M A, BRUCCOLERI C, et al. The pyramid star identification technique [J]. Navigation, 2004, 51(3): 171-183.
- [3] SILANI E, LOVERA M. Star identification algorithms: novel approach & comparison study [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2006, 42(4): 1275-1288.
- [4] 张广军, 魏新国, 江洁. 一种改进的三角形星图识别方法 [J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1150-1154.
ZHANG G J, WEI X G, JIANG J. Star map identification based on a modified triangle algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1150-1154. (in Chinese)
- [5] 刘先一, 周召发, 张志利, 等. 亮星辅助下基于坐标转换的快速星图识别方法 [J]. 航空学报, 2020, 41(8): 82-89.
LIU X Y, ZHOU Z F, ZHANG Z L, et al. Fast star identification based on coordinate transformation assisted by bright stars [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(8): 82-89. (in Chinese)
- [6] PADGETT C, KREUTZ-DELGADO K. A grid algorithm for autonomous star identification [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 1997, 33(1): 202-213.
- [7] ZHANG G J, WEI X G, JIANG J. Full-sky autonomous star identification based on radial and cyclic features of star pattern [J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(7): 891-897.
- [8] LEE H, BANG H. Star pattern identification technique by modified grid algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1112-1116.
- [9] NA M, ZHENG D N, JIA P F. Modified grid algorithm for noisy all-sky autonomous star identification [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 516-522.
- [10] 张刘, 何金航, 刘赫, 等. 基于等面积圆环和伴星夹角的

- 星图识别算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(3): 821-827.
- ZHANG L, HE J H, LIU H, et al. Star identification algorithm based on equal-area circle and companion star pinch angle [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(3): 821-827. (in Chinese)
- [11] 胡坤, 陈嘉鸿, 谢元平. 一种基于旋转不变特征的星图识别算法[J]. 光电工程, 2015, 42(6): 20-26.
- HU K, CHEN J H, XIE Y P. A Novel star pattern identification algorithm based on rotation-invariant [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(6): 20-26. (in Chinese)
- [12] 王华超, 刘静, 程昊文, 等. 基于模糊决策的快速星图识别[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(5): 1447-1453.
- WANG H C, LIU J, CHENG H W, et al. Fast star map recognition algorithm based on fuzzy decision [J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(5): 1447-1453. (in Chinese)
- [13] 王泽文, 王广君, 刘小波, 等. L2 范式距离的星图识别方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 234-240.
- WANG Z W, WANG G J, LIU X B, et al. Star map recognition method of L2 normal distance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 234-240. (in Chinese)
- [14] 王军, 何昕, 魏仲慧, 等. 基于多特征匹配的快速星图识别[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1870-1879.
- WANG J, HE X, WEI Z H, et al. Fast star identification algorithm based on multi-feature matching [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1870-1879. (in Chinese)
- [15] ZHANG Y J, ZHENG M T, XIONG J X, et al. On-orbit geometric calibration of ZY-3 three-line array imagery with multistrip data sets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 224-234.
- [16] WU J, ZHOU Z B, GAO B, et al. Fast linear quaternion attitude estimator using vector observations [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(1): 307-319.
- [17] LUO L, HUANG Y L, ZHANG Z, et al. A position loci-based in-motion initial alignment method for low-cost attitude and heading reference system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-18.
- [18] ZHOU X R, XU X, YAO Y Q, et al. A robust quaternion Kalman filter method for MIMU/GPS In-motion alignment[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 8503109.
- [19] WU J. Real-time magnetometer disturbance estimation via online nonlinear programming [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12): 4405-4411.
- [20] WU J, ZHOU Z B, FOURATI H, et al. Generalized linear quaternion complementary filter for attitude estimation from multisensor observations: an optimization approach[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(3): 1330-1343.
- [21] ZHANG G, JIANG Y H, LI D R, et al. In-orbit geometric calibration and validation of ZY-3 linear array sensors [J]. The Photogrammetric Record, 2014, 29(145): 68-88.
- [22] LI J C, GAO W, ZHANG Y, et al. Gradient descent optimization-based self-alignment method for stationary SINS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(9): 3278-3286.
- [23] 冯婕, 崔益豪, 李豫东, 等. CMOS 有源像素传感器辐射损伤对星敏传感器星图识别影响机理与识别算法[J]. 物理学报, 2022, 71(18): 139-147.
- FENG J, CUI Y H, LI Y D, et al. Influence mechanism and recognition algorithm of CMOS active pixel sensor radiation damage on star sensor star map recognition [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(18): 139-147. (in Chinese)
- [24] 梁莹, 蔡善军, 张丽娜, 等. 一种改进的快速全天星图识别算法[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(3): 87-91.
- LIANG Y, CAI S J, ZHANG L N, et al. An improved fast all-sky star map recognition algorithm [J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(3): 87-91. (in Chinese)
- [25] 金杰, 谢俊峰, 李响. 一种多主星模型的多视场星图识别方法[J]. 激光与红外, 2021, 51(7): 962-968.
- JIN J, XIE J F, LI X. A multi-FOV star recognition method based on multi-master stars model [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(7): 962-968. (in Chinese)
- [26] 王晋麟, 吕建强, 陈凯, 等. 轨道转移飞行器复杂环境下假星干扰与星图识别研究[J]. 航天控制, 2021, 39(2): 51-56, 68.
- WANG J L, LYU J Q, CHEN K, et al. Research on false star interference and star map recognition in complex environment of orbit transfer vehicle [J]. Aerospace Control, 2021, 39(2): 51-56, 68. (in Chinese)