

文章编号 1004-924X(2019)08-1870-10

基于多特征匹配的快速星图识别

王 军^{1,2}, 何 昕¹, 魏仲慧^{1*}, 吕 游¹, 穆治亚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:随着星敏传感器探测灵敏度的提高,导航星表中恒星的数量急剧增加,导致星图识别的识别速度和识别率降低。因此,为了提高星图识别的识别速度和识别率,文中在三角形算法的基础上提出了一种基于多特征匹配的快速星图识别算法。首先,采用天球的内接正二十面体法对预处理后的星表进行分区。然后,将特征三角形的边长以及外接圆和内切圆半径的乘积作为特征值构建导航特征库,并根据后者的哈希函数对特征库进行分块。在识别的过程中,利用观测三角形外接圆和内切圆半径乘积的哈希函数实现导航特征库子块的快速定位,并在该子块内采用多特征匹配的方法得到观测三角形的识别结果,最后根据该结果确定星敏传感器视场所包含的天球子区域,并在子区域内完成视场中其它导航星的识别。实验结果表明,文中算法的识别性能与导航特征库的分块数有关,在选择合适的分块数后,与常用三角形算法相比,算法在识别速度、识别率以及对星等误差和假目标的鲁棒性等方面具有明显的优势,算法的平均识别时间和识别率分别为 17.161 ms 和 98.58%,满足星敏传感器对高识别速度和识别率的要求。

关键词:星敏传感器;星图识别;天球分区;多特征匹配

中图分类号: V448.22 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192708.1870

Fast star identification algorithm based on multi-feature matching

WANG Jun^{1,2}, HE Xin¹, WEI Zhong-hui^{1*}, LÜ You¹, MU Zhi-ya¹

(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: ciomp_wzh@163.com

Abstract: With the improving detection sensitivity of star sensors, the number of stars in star catalogs has increased dramatically, reducing the speed and rate of star identification. To improve the identification speed and rate, a fast star identification algorithm based on multi-feature matching and built upon the foundation of the triangle algorithm was proposed. First, the preprocessed star catalog was partitioned using the inserted icosahedron of the celestial sphere. Then, the navigation feature library was constructed with the sides and the product of the radii of circumcircles and incircles as feature values. In addition, the navigation feature library was stored in blocks according to the hash function of the latter feature value. In the process of star identification, the product of the radii of the circumcircle and incircle in the observation triangle was used to rapidly locate the block of the navigation feature library, and then the observation triangle was identified in the block by using multi-

收稿日期:2019-01-15;修订日期:2019-01-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51605465);吉林省科技发展计划项目(No. 20180201013GX)

feature matching. Finally, the sub-regions of the celestial sphere in the field of view were obtained, and then other navigation stars were identified in the sub-regions. The experimental results indicate that the identification performance of the proposed algorithm is related to the number of blocks. Based on a reasonable number of blocks, the proposed algorithm has advantages in identification speed and rate as well as in its robustness to star magnitude noise and false stars, compared with common triangle algorithms. The average identification time and rate of the proposed algorithm are 17.161 ms and 98.58%, respectively, which can meet the star sensor requirements for high identification speed and rate.

Key words: star sensor; star identification; celestial partition; multi-feature matching

1 引言

星敏传感器是一种以恒星为测量对象的高精度、高可靠性的姿态敏感测量仪器,目前已经广泛应用于深空探测以及天文导航等空间任务中。在星敏传感器刚进入工作状态或者出现姿态丢失的情况下,星敏传感器需要进行全天球星图识别进而完成姿态的捕获,其主要工作原理为:利用图像传感器对星空成像,经过星点提取和质心定位得到星点在传感器靶面上的位置和亮度信息,之后利用星图识别算法为星点找到其在星表中对应匹配的导航星,最后根据识别结果解算出星敏传感器相对于惯性坐标系的三轴姿态。星图识别算法是星敏传感器工作过程中的关键技术,但是随着星敏传感器探测灵敏度的提高,星表中导航星的数量增多,数据量增大,严重影响星图识别的识别速度和识别率,因此,识别速度快,识别率高的星图识别算法一直是星敏传感器的主要研究内容。

星图识别算法从识别策略上主要分为子图同构法和模式识别法^[1],其中子图同构法中的三角形算法^[2]因其计算复杂度低,可移植性强,已经在工程中得到了广泛应用。但是三角形算法利用导航星之间的星角距作为特征值进行匹配,特征维数较低,容易出现冗余匹配和误匹配的问题,因此识别率较低,此外,每个观测三角形需要进行多次匹配,因此识别速度较慢。虽然 Mortari 等^[3]在三角形算法的基础上又引入一颗导航星,提出了一种金字塔算法,提高了星图识别的识别率,但三角形匹配后需要利用第四颗星验证匹配的唯一性,影响了星图识别的速度。因此,国内外的研究机构提出了许多三角形算法的改进算法。Fan 等^[4]利用每个导航星与其邻域内最亮的几颗导航星组成多个特征三角形,并将三角形的边和高作为特征值构建导航特征库,在识别时分别按照边

和高进行筛选,再利用星角距进行匹配,提高了星图识别的识别率,但是该方法在识别时特征值计算复杂度较高,影响了星图识别的速度。Arani 等^[5]提出了一种基于邻星特征的星图识别算法,首先在星表中任选一颗导航星作为主星,并将其和邻域内的三颗辅星组成三个特征三角形,然后利用主星所在的顶角,主星到辅星的星角距以及特征三角形的面积等多个特征值构建导航特征库,在识别时采用 K 矢量查找法^[6]对导航特征库进行检索,提高了星图识别的识别率,但是该方法采用的特征值较多,在识别时特征值计算复杂度很高,严重影响了星图识别的速度。张同双等^[7]首先构建了特征三角形最大内角及其两边的导航特征库,并利用最大内角的散列函数对特征库进行分块,在识别时根据散列函数对子块进行快速定位,并在子块内利用星角距对观测三角形进行匹配,缩小了导航特征库的检索范围,但是该方法在识别时需要利用三角形的边长通过反余弦函数计算最大内角,计算复杂度较高,影响了星图识别的速度。樊巧云等^[8]将三角形的形心惯性比和最长边作为特征值构建导航特征库,并根据最长边的散列函数对特征库进行分块,在识别时根据散列函数对子块进行快速定位,并在子块内利用形心惯性比进行匹配,将三角形的特征维数由三维降低至二维,减小了特征值计算和匹配的复杂度,但是该方法在识别时需要姿态进行多次解算,严重影响了星图识别的速度。张广军等^[9]提出了一种基于天球内接正方体的星表分区方法,在识别时缩小了星表的检索范围,提高了星图识别的速度,但是该方法对天球的分区程度不高,每个分区内包含的导航星数量较多,通常需要对每个分区进行多次细分,增加了导航特征库构建的复杂度。陈朝阳^[10]等以及王海涌^[11]等将星图中最亮的两个星点作为主星,将其它星点作为辅星进行星图识别,减小了导航特征库的容量,提高了星图

识别的速度,但是受气象和图像传感器成像等因素的影响,当星图中主星的亮度接近或低于辅星的亮度时,星图识别的识别率严重降低。

针对目前常用三角形算法存在的不足,文中提出了一种基于多特征匹配的快速星图识别算法。一方面,采用天球的内接正二十面体法对星表进行分区,并采用哈希函数对导航特征库进行分块,提高了星图识别的速度,另一方面,采用多特征匹配的方法提高了星图识别的识别率。

2 导航星表的构建

2.1 星表预处理

星表是一种包含恒星编号、星等、赤经和赤纬等信息的数据库。图 1 为国家天文台某星表中恒星的赤经和赤纬分布^[12],该星表给出了 77 189 颗星等不高于 10 的恒星的信息。从图中可以看出,原始星表中恒星的分布数量较多,数据量较大,在实际应用的过程中会占用较多的存储空间,因此在使用之前需要对原始星表进行预处理。

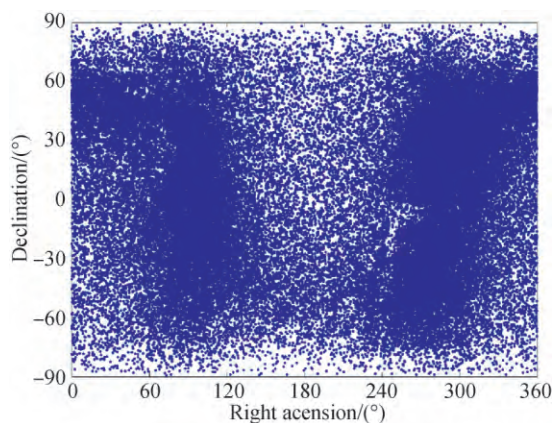


图 1 原始星表中恒星的分布

Fig. 1 Distribution of stars in original star catalog

星等是代表恒星亮度的指标,规定零等星的辐照度为 $E_0 = 2.96 \times 10^{-14} \text{ W/mm}^2$,根据普森公式,星等为 m 的恒星的辐照度约为^[13]:

$$E_m = E_0 \cdot 2.512^{-m}. \quad (1)$$

由公式(1)可知,星等每增加一等,恒星的辐照度约降低 2.512 倍,星等越高,恒星的亮度越暗。受星敏传感器探测灵敏度的限制,许多暗星在实际成像的过程中不会被图像传感器探测到,因此星表的预处理首先要筛选掉星表中星等较高的暗星。此外,为了保证星点质心定位的精度,星敏

传感器在像面调整时通常采用离焦技术使无穷远的星光信号弥散到多个像元上,形成传感器靶面上的星点,当星表中两颗恒星之间的星角距过小时,成像后传感器靶面上的两个星点会融合为一个星点,严重影响星图识别的识别率,因此,在星等筛选后还需要对原始星表中的“双星”进行处理,通常的做法为将其从星表中剔除。

2.2 星表分区

当星敏传感器对星空成像时,由于视场大小的限制,其通常只能对某一片天区进行成像,而传统星图识别算法在识别的过程中需要对整个星表进行检索,严重影响了星图识别的识别速度。为了解决这一问题,通常的做法为把整个天区划分成若干个子区域,即对星表进行分区^[9]。常用的星表分区方法包括赤纬法、圆锥法、球面矩形法以及内接正方体法,这些方法虽然在一定程度上提高了星表检索的速度,但仍然存在着星表分区不均匀,分区程度低等问题。

针对以上问题,文中将整个天区近似为一个球体,并采用一种天球的内接正二十面体法对天球进行分区。如图 2 所示,天球中心 O 和天球内接正二十面体每个面中 3 个顶点的连线构成一个锥体,锥体和球面相交并将其表面分成 20 个区域,分别编号为 $S_1 \sim S_{20}$,对于 $S_1 \sim S_{20}$ 中的每一个区域,再将其等分成 $(N+1)^2$ 个子区域,并对每个子区域进行编号,因此整个天球可以被划分成 $20 \times (N+1)^2$ 个子区域,其中 N 在理论上的取值范围为 $N \in [0, +\infty)$,在实际应用的过程中需要根据星敏传感器视场的大小选择合适的值。当 $N=0$ 时,表示不再对 $S_1 \sim S_{20}$ 进行划分,此时分区后星表中的恒星分布如图 3 所示。

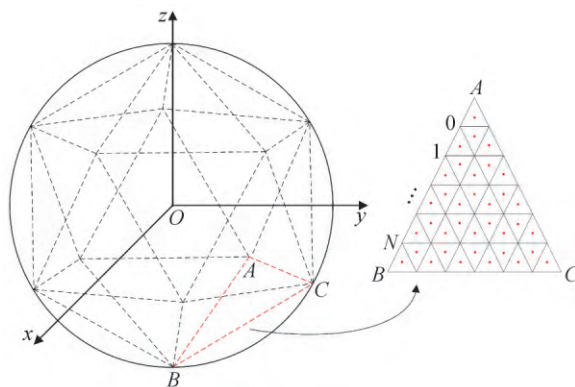


图 2 天球分区

Fig. 2 Celestial sphere partition

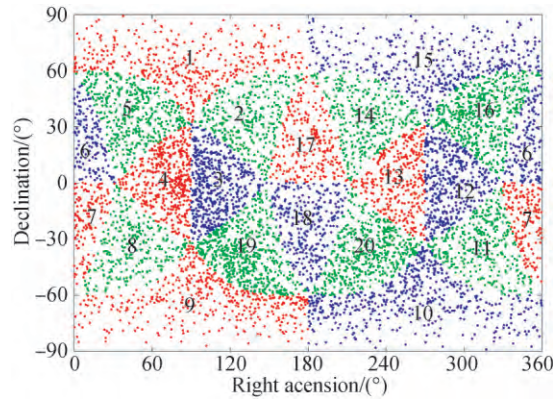


图 3 分区后星表中恒星的分布

Fig. 3 Distribution of stars in partitioned star catalog

根据上述星表分区的方法,对整个星表进行遍历,并将每个导航星归类到相应的子区域中,最终完成星表的分区。在分区后的星表中,编号为 i 的导航星的信息不仅包括星等、赤经、赤纬等信息,还包括其所在子区域和相邻子区域的编号。

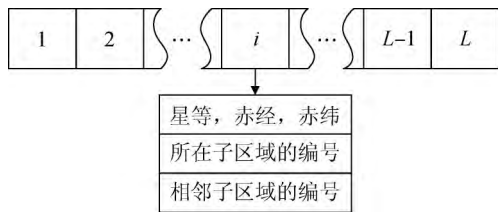


图 4 分区后星表中恒星的信息

Fig. 4 Information of stars in partitioned star catalog

当已知星敏感器视场中部分星点所在的子区域后,可以根据分区后的星表快速确定星敏感器视场所包含的天球子区域,并在子区域中对导航星进行检索,缩小了星表检索的范围,从而提高了星图识别速度。

2.3 导航特征库的构建

导航特征库的构建是星图识别的基础,在传统三角形算法中,一般选择三角形的边长、周长、顶角、高、面积等几何参数作为特征值,这些特征都具有平移、旋转不变性的特点。但是仅采用边长、周长作为特征值时特征值的维数较低,在识别时容易出现误匹配的问题,而采用顶角、高、面积作为特征值时又增加了特征值计算的复杂度,因此,需要引入新的特征值或特征值的组合对传统三角形算法进行改进。

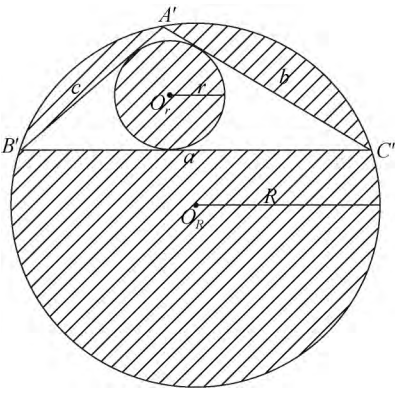


图 5 特征三角形的构建

Fig. 5 Construction of feature triangle

文中根据三角形外接圆和内切圆半径的关系构建特征三角形 $\triangle A'B'C'$,如图 5 所示。 $\triangle A'B'C'$ 的边长分别为 a, b 和 c ,外接圆 $\odot O_R$ 和内切圆 $\odot O_r$ 的半径分别为:

$$\begin{cases} R = \frac{abc}{4\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}} \\ r = \sqrt{\frac{(p-a)(p-b)(p-c)}{p}} \end{cases}, \quad (2)$$

其中 $p = \frac{1}{2}(a+b+c)$ 。

根据公式(2),可以得到 $\triangle A'B'C'$ 外接圆和内切圆的半径满足关系:

$$M_i = R \times r = \frac{abc}{2(a+b+c)}. \quad (3)$$

公式(3)说明任意三角形外接圆和内切圆半径的乘积仅与三角形的边长有关,计算复杂度较低,因此文中将其与特征三角形的边长作为主要特征值,如表 1 所示。

表 1 特征三角形的特征值

Tab. 1 Feature values of feature triangle

编号	特征值
1	最长边对应的导航星编号
2	次长边对应的导航星编号
3	最短边对应的导航星编号
4	最长边的边长
5	次长边的边长
6	最短边的边长
7	外接圆和内切圆半径的乘积

在表 1 中,特征三角形的边长通常用两颗导航星之间的星角距表示。对于星表中编号为 m 和 n 的导航星来说,其惯性矢量分别为:

$$\mathbf{u}_m = \begin{bmatrix} \cos \alpha_m \cos \delta_m \\ \sin \alpha_m \cos \delta_m \\ \sin \delta_m \end{bmatrix}, \mathbf{u}_n = \begin{bmatrix} \cos \alpha_n \cos \delta_n \\ \sin \alpha_n \cos \delta_n \\ \sin \delta_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 (α_m, δ_m) 和 (α_n, δ_n) 分别为导航星 m 和 n 的赤经和赤纬。

根据式(4),导航星 m 和 n 之间的星角距为:

$$dc_{mn} = \arccos \left(\frac{\mathbf{u}_m \cdot \mathbf{u}_n}{|\mathbf{u}_m| \times |\mathbf{u}_n|} \right), \quad (5)$$

其中:符号“ $\cdot$ ”代表矢量的内积,“ $|\mathbf{u}|$ ”代表矢量的模。

利用公式(5)可以计算特征三角形的边长 a, b, c ,进而得到特征三角形外接圆和内切圆半径的乘积 M_i 。

利用预处理后的星表,根据表 1 中的特征值构建导航特征库,导航特征库的构建方法如图 6 所示。首先从星表中选取三颗导航星并记录其编号,然后计算导航星之间的星角距作为特征三角形的边长,并根据计算结果判断三颗导航星是否共线,若共线则需重新选取三颗导航星,若不共线则利用三颗导航星之间的星角距计算特征三角形外接圆和内切圆半径的乘积,最后将特征三角形的全部特征值存储到导航特征库中,当星表中任意三颗导航星的组合都被遍历后即完成导航特征库的构建。

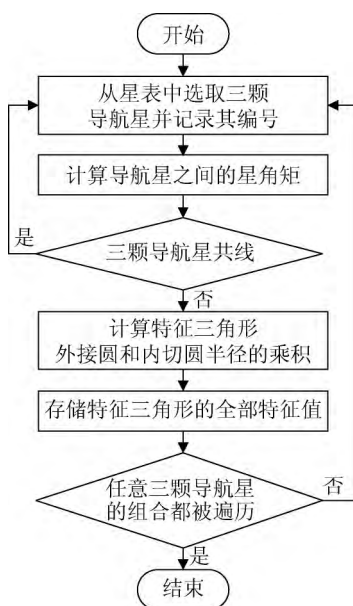


图 6 导航特征库的构建

Fig. 6 Construction of navigation feature library

通过图 6 中的方法可以完成导航特征库的初步构建,但通常导航特征库中特征三角形的数量较多,采用传统的检索方法无法对导航特征库进行快速检索。因此,为了提高导航特征库的检索速度,文中通过构造特征三角形外接圆和内切圆半径乘积的哈希函数^[14-16]将导航特征库分成 N_f 块,特征三角形与所在分块的关系为:

$$h = \text{round} \left(\frac{(N_f - 1) \times (M_f - M_{\min})}{M_{\max} - M_{\min}} + 1 \right), \quad (6)$$

其中: $\text{round}(x)$ 表示 x 向最近的方向取整, $M_{\min}$ 和 $M_{\max}$ 分别为导航特征库中外接圆和内切圆半径乘积的最小值和最大值, h 为哈希函数的值,代表特征三角形所在导航特征库分块的编号,其值域为 $\{h | 1 \leq h \leq N_f, h \in \mathbb{Z}\}$ 。

3 基于多特征匹配的快速星图识别

3.1 观测三角形的构建

星敏感器的成像模型可以近似为一个针孔成像模型^[17],其将无穷远处的恒星星光视为平行光,通过光学系统映射到图像传感器的靶面上,最终得到靶面上的星点,星敏感器的成像模型如图 7 所示。

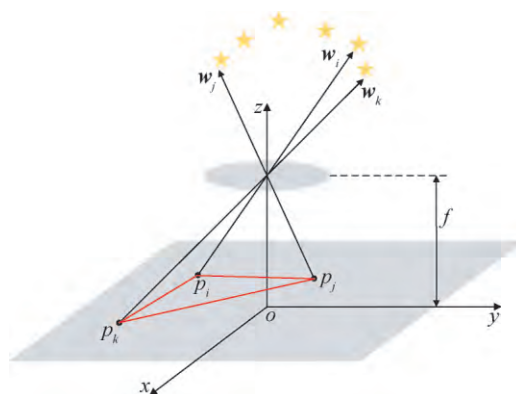


图 7 星敏感器的成像模型

Fig. 7 Imaging model of star sensor

图 7 中的 $\triangle p_i p_j p_k$ 为星敏感器坐标系中的一组观测三角形,星点 p_i, p_j 和 p_k 为导航星在图像传感器靶面上的映射,其质心坐标分别为 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 和 (x_k, y_k) 。其中, p_i 和 p_j 两个星点在星敏感器坐标系中的观测矢量分别为 w_i 和 w_j ,其计算方法为:

$$\begin{cases} w_i = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}} [-x_i & -y_i & f]^T \\ w_j = \frac{1}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2 + f^2}} [-x_j & -y_j & f]^T \end{cases}, \quad (7)$$

式中 f 为星敏感器的焦距。

根据公式(7),星点 p_i 和 p_j 在星敏感器坐标系中的星角距为:

$$ds_{ij} = \arccos\left(\frac{w_i \cdot w_j}{|w_i| \times |w_j|}\right). \quad (8)$$

根据公式(8)同样可以计算出星点 p_j 和 p_k 之间的星角距 ds_{jk} ,星点 p_i 和 p_k 之间的星角距 ds_{ik} ,即为观测三角形的边长,再根据公式(3)计算出观测三角形外接圆和内切圆半径的乘积 M_s ,共同组成观测三角形的特征值。

通常,利用星图中的全部星点可以构建多组观测三角形,但是在实际应用的过程中应尽量在靠近视场中心的位置选取星角距较大的观测三角形,以减小镜头畸变和星点质心定位误差对观测三角形特征值的影响。

3.2 星图识别

在构建的观测三角形 $\triangle p_i p_j p_k$ 的基础上,首先利用其外接圆和内切圆半径的乘积 M_s 通过公式(6)计算出观测三角形在导航特征库中所在的分块,然后在该分块内通过下式对特征三角形进行初步筛选:

$$|M_s - M_t| \leq \epsilon_M, \quad (9)$$

其中 ϵ_M 为外接圆和内切圆半径乘积的误差门限。

在根据公式(9)获得筛选结果后,再利用星角距对筛选结果进行进一步匹配:

$$\begin{cases} |ds_{ij} - dc_{nm}| \leq \epsilon_d \\ |ds_{ik} - dc_{nl}| \leq \epsilon_d \\ |ds_{jk} - dc_{ml}| \leq \epsilon_d \end{cases}, \quad (10)$$

其中: ϵ_d 为星角距的误差门限, dc_{nm} , dc_{ml} 和 dc_{nl} 为导航特征库中特征三角形的边长。

如果根据式(9)和式(10)得到的匹配结果唯一,则观测三角形 $\triangle p_i p_j p_k$ 识别成功,此时星图中 p_i, p_j, p_k 3个星点所对应的导航星编号分别为 m, n, l ,将识别得到的导航星的编号,星等,赤经和赤纬等信息进行存储。如果得到的匹配结果不唯一,则根据文中观测三角形的构建原则,从星图中选取第4个星点与原观测三角形中的2个星点重新构建观测三角形进行识别,排除冗余匹配的结果。

当星图中至少有3个星点被识别后,将已识

别导航星所在星表子区域的编号以及相邻子区域的编号共同组成集合 S 。在星表分区时,若 N 选择合理,集合 S 可以包含星敏感器视场内所有的导航星,因此,在对星图中的其它星点进行识别时,观测三角形只与三颗导航星都属于集合 S 的特征三角形进行匹配,减小了导航特征库的容量,提高了星图识别速度。

4 实验结果与分析

在处理器为 Intel Core i5-7300HQ,主频为 2.5 GHz 的计算机上利用 Matlab 和外场观星获取的星图进行实验,实验中星敏感器的参数如表2所示。实验选用国家天文台星表,在剔除双星以及高于 6.5 mV 的恒星后,星表中的恒星数为 7 559 颗,星表的容量约为 265 kB。在利用第 2.3 节中的方法构建导航特征库后,需要根据表 2 中星敏感器的参数对导航特征库进行筛选。由星角距的定义可知,当图像传感器上的两个星点分别位于靶面的对角时,星点之间的星角距最大,其值约为:

$$d_{\max} = 2 \arctan\left(\frac{1.024 \sqrt{2} \times 6.5 \times 10^{-3}}{30.1}\right) \approx 35^\circ. \quad (11)$$

根据公式(11)对导航特征库进行筛选,剔除导航特征库中边长大于 $d_{\max}$ 的特征三角形,最后得到适用于文中星敏感器的导航特征库,其容量约为 58.6 MB,可以满足工程应用的要求。此外,利用导航星的编号和导航星之间的星角距建立通用导航特征库,其容量约为 45.5 MB。相较于文中算法的导航特征库,其包含的特征值少,因此容量小。

表 2 星敏感器参数

Tab. 2 Parameters of star sensor

编号	性能指标	参数
1	视场/(°)	25×25
2	焦距/mm	30.1
3	分辨率	2 048×2 048
4	像元尺寸/ μm	6.5
5	探测灵敏度/mV	+6.5
6	积分时间/ms	30

4.1 分块数对识别性能的影响

文中算法的识别性能与导航特征库的分块数 N_f 有关,因此,为了验证分块数对算法识别性能的影响,在不同分块数的条件下,分别对算法的识别速度和识别率进行分析。

首先,为了验证分块数对算法识别速度的影响,利用实际拍摄的 500 帧星图,在不同分块数的条件下,以观测星数相同的星图统计星图识别时间的平均值,并与三角形算法和金字塔算法进行对比,实验结果如图 8 所示。

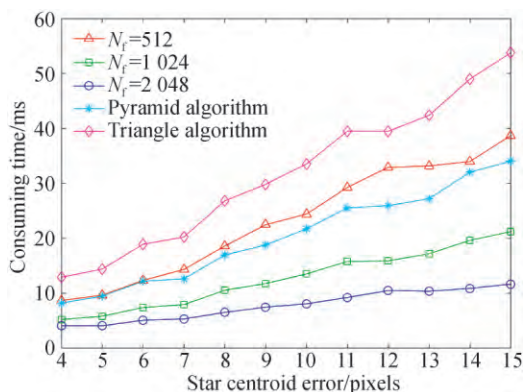


图 8 不同星数下算法的识别速度

Fig. 8 Identification speed under different number of stars

由图 8 中的实验结果可知,当分块数一定时,星图中的星数越多,算法需要的识别时间越长,识别速度越慢,当星图中的星数一定时,分块数越多,算法需要的识别时间越短,识别速度越快。当分块数为 1 024 和 2 048 时,文中算法的识别速度明显快于三角形算法和金字塔算法,当分块数为 512 时,文中算法的识别速度介于金字塔算法和三角形算法之间,星图中的星数越多,各个算法识别速度之间的差距越明显。对于文中算法,当导航特征库的容量一定时,分块数越多,每个分块内特征三角形的数量越少,识别速度越快。三角形算法需要对特征三角形中的星角距进行逐一匹配,因此识别速度较慢,而金字塔算法在三角形算法的基础上进行了改进,减小了导航特征库的容量,提高了识别速度。

此外,为了验证分块数对算法识别率的影响,在实际拍摄的 500 帧星图的提取数据中分别加入不同大小的质心误差,在不同分块数的条件下,统计星图识别的平均识别率,并与三角形算法和金字塔算法进行对比,实验结果如图 9 所示。

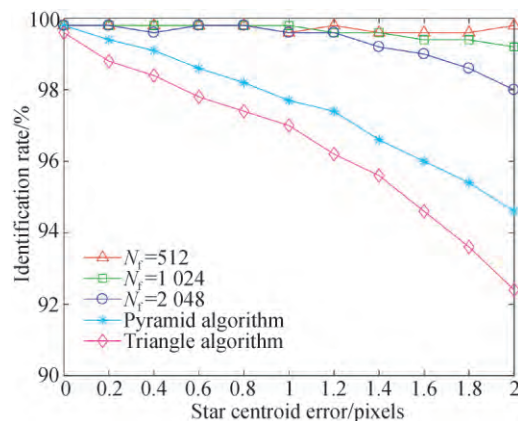


图 9 不同星点质心误差下的识别率

Fig. 9 Identification rate under different star centroid errors

由图 9 中的实验结果可知,在同样的实验条件下,文中算法的识别率明显高于三角形算法和金字塔算法。对于文中算法,当分块数一定时,质心定位误差越大,算法的识别率越低,当质心定位误差一定时,分块数越多,算法的识别率越低,这是因为文中算法采用哈希函数对导航特征库进行分块,当分块数过多时,容易受质心定位误差的影响,造成错误定位分块的问题,导致识别率降低。

因此,根据以上的实验结果,为了保证文中算法具有较高的识别速度和识别率,选择导航特征库的分块数 N_f 为 1 024。

4.2 假目标对识别性能的影响

在星敏传感器实际工作的过程中,当有杂散光或其它非恒星目标进入视场时,会在星图中产生近似星点的假目标,对星图识别的识别率造成影响。因此,为了验证假目标对文中算法识别率的影响,在实际拍摄的 500 帧星图的视场中心附近分别加入不同数量的星等约为 4.0~5.0 mV 的假目标,统计星图识别的平均识别率,并与三角形算法和金字塔算法进行对比,实验结果如图 10 所示。

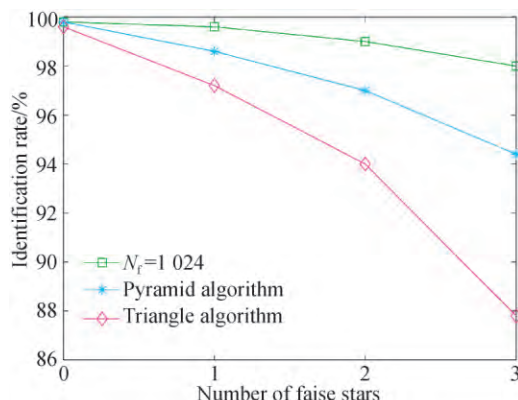


图 10 不同数量假目标下的识别率

Fig. 10 Identification rate under different number of false stars

由图 10 中的实验结果可知,随着星图中假目标数量的不断增多,3 种算法的识别率都有明显的下降,主要原因为星图中的假目标增加了星图识别过程中冗余匹配和误匹配的概率。文中算法的识别率高于三角形算法和金字塔算法,因为文中算法在获得初步的识别结果后,仅在天球子区域中对其它星点进行识别,不易受假目标的影响,而金子塔算法在三角形算法的基础上增加了一个星点对识别结果进行验证,降低了冗余匹配和误匹配的概率。

4.3 星等误差对识别性能的影响

图 11 为利用星敏感器成像并预处理后的局部星图,表 3 为星图中星点提取并识别后的结果。



图 11 预处理后的星图

Fig. 11 Preprocessed star image

表 3 星点提取与识别结果

Tab. 3 Extraction and identification results of stars

星点编号	质心坐标/pixel	最大灰度值	星等/mV
1	(890.833, 1 401.074)	61 680	3.82
2	(1 040.822, 1 308.140)	57 311	4.61
3	(1 133.886, 1 312.169)	55 512	4.29
4	(1 257.850, 624.178)	53 456	4.14
5	(855.247, 1 288.155)	49 344	4.95
6	(756.273, 963.263)	46 774	5.03
7	(769.186, 673.866)	41 377	5.17
8	(1 476.189, 1 311.744)	29 298	5.72
9	(578.114, 939.495)	27 499	5.89

如表 3 所示,受气象条件和图像传感器成像等因素的影响,星点 2 和星点 4 的实测灰度值与其星等大小不成比例,星点 2 的灰度值高于星点 4,但其星等却比星点 4 大。此时,采用文中算法能够对星图进行正确的识别,而采用基于主星的三角形算法进行识别时,无法给出正确的识别结果,因为基于主星的三角形算法将星图中灰度值最大的两个星点作为主星进行识别,当主星的实际亮度低于辅星时,星图识别的识别率较低,而文中算法是在星角距的基础上进行识别,在识别时并未采用星等作为特征值,因此几乎不受星等误差的影响。

在对文中算法识别性能的影响因素进行分析后,将星敏感器实际拍摄的连续 1 200 帧星图进行预处理和星点提取,并采用文中算法,三角形算法以及金字塔算法在相同的仿真环境下分别对星图进行识别,记录识别的星图数和平均的识别时间,实验结果如表 4 所示。

表 4 不同识别算法的性能对比

Tab. 4 Performance comparison of different algorithms

识别算法	平均识别时间/ms	识别星图数	识别率/%
三角形算法	42.904	1 101	91.75
金字塔算法	27.711	1 154	96.17
文中算法	17.161	1 183	98.58

由表 4 中的实验结果可知,在相同的实验条件下,文中算法,三角形算法以及金字塔算法的平均识别时间分别为 17.161,42.904 和 27.711 ms,识别率分别约为 98.58%,91.75%和 96.17%。由实验结果可以看出,相较于三角形算法和金字塔算法,文中算法的识别速度更快,识别率更高。主要是因为文中算法对导航特征库进行了分块并对导航星表进行了分区,缩小了特征三角形的检索范围,减少了特征三角形的匹配次数,提高了星图识别的速度;此外,文中算法采用多特征匹配的方法进行星图识别,降低了冗余匹配和误匹配的概率,提高了星图识别的识别率。下一步将在算法的硬件移植和优化等方面进行深入研究,使文中算法在分块数较少的情况下,能够同时具备较高的识别速度和识别率。

5 结 论

针对目前普遍采用的三角形算法存在的不足,文中提出了一种基于多特征匹配的快速星图识别算法。首先,在对原始星表进行预处理后,采用天球的内接正二十面体法对星表进行分区。然后,将特征三角形的边长以及外接圆和内切圆半径的乘积作为特征值构建导航特征库,并根据外接圆和内切圆半径乘积的哈希函数对特征库进行分块。在识别的过程中,利用观测三角形外接圆和内切圆半径乘积的哈希函数实现导航特征库子块的快速定位,并在该子块内采用外接圆和内切圆半径的乘积对特征三角形进行初步筛选,再利用星角距对筛选结果进行进一步匹配得到初步的识别结果,最后根据该结果确定星敏传感器视场所

包含的天球子区域,并在子区域内完成视场中其它导航星的识别。

文中首先分析了导航特征库分块数对算法识别速度和识别率的影响,并与其它两种算法进行对比实验,结果表明选择分块数为 1 024 对文中的导航特征库进行分块可以达到较高的识别速度和识别率。此外,在导航特征库分块数为 1 024 的条件下,文中进一步分析了星图中的星等误差和假目标对算法识别率的影响,并与其它算法进行对比实验,结果表明相较于其它几种算法,文中算法对星图中的星等误差和假目标都具有较高的鲁棒性。最后,分析了文中算法对实际拍摄星图的识别速度和识别率,结果表明文中算法的平均识别时间和识别率分别为 17.161 ms 和 98.58%,相较于其它两种常用算法具有明显的优势,满足星敏传感器对高识别速度和识别率的要求。

参考文献:

- [1] 张广军. 星图识别 [M]. 北京:国防工业出版社, 2011: 22-29.
ZHANG G J. *Star Identification* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 22-29. (in Chinese)
- [2] JUNKINS J L, WHITE C C, TURNER J D. Star pattern recognition for real-time attitude determination [J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1977, 25(3): 251-270.
- [3] MORTARI D, JUNKINS J L, SAMAAAN M A. Lost-in-space pyramid algorithm for robust star pattern recognition [C]. *Proceedings of the Annual ASS Rocky Mountain Guidance and Conference, Breckenridge, Colorado*, 2001: 49-68.
- [4] FAN Q Y, ZHONG X Y. A triangle voting algorithm based on double feature constraints for star sensors [J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(4): 1132-1142.
- [5] ARANI M S, TOLOEI A, EGHBALEH Z. A geometric star identification algorithm based on triple triangle pattern [C]. *Recent Advances in Space Technologies (RAST), International Conference on IEEE*, 2015: 81-85.
- [6] MORTARI D, SAMAAAN M A, BRUCCOLERI C, et al.. The pyramid star identification technique [J]. *Navigation*, 2004, 51(3): 171-183.
- [7] 张同双,郭敬明,柏杨,等. 基于最大内角的三角形星图识别算法 [J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(1): 208-216.
ZHANG T SH, GUO J M, BAI Y, et al.. Star identification algorithm based on the maximum interior angle in triangle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 208-216. (in Chinese)
- [8] 樊巧云,陆壮志,魏新国,等. 基于惯性比特特征的三角形星图识别算法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2838-2843.
FAN Q Y, LU ZH ZH, WEI X G, et al.. Triangle star identification algorithm based on inertia ratio [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2838-2843. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 陈朝阳,王波,张晨. 基于主星对的星图识别算法 [J]. *计算机仿真*, 2004, 21(6): 51-53.
CHEN CH Y, WANG B, ZHANG CH. Star pattern recognition algorithm based on main star pair. [J]. *Computer simulation*, 2004, 21(6): 51-53. (in Chinese)
- [11] 王海涌,费峥红,张超. 改进的基于主星的星图识别算法 [J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(1): 220-224.

- WANG H Y, FEI ZH H, ZHANG C. An improved star pattern identification algorithm based on main star [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 220-224. (in Chinese)
- [12] ZHU H L, LIANG B, ZHANG T. A robust and fast star identification algorithm based on an ordered set of points pattern [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 148: 327-336.
- [13] 何家维. 高精度全天时星敏传感器关键技术研究 [D]. 北京:中国科学院, 2013.
HE J W. *Study on the Key Technologies for High-Accuracy and All-Time Star Sensor* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [14] WANG G Y, LI J, WEI X G. Star identification based on hash map [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(4): 1591-1599.
- [15] 张磊,魏仲慧,何昕,等. 快速全天自主星图识别 [J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(4): 909-915.
ZHANG L, WEI ZH H, HE X, *et al.*. Fast all-sky autonomous star identification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 909-915.
- [16] 张磊,何昕,魏仲慧,等. 三角形星图识别算法的改进 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(2): 458-463.
ZHANG L, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Modification of triangle identification algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 458-463. (in Chinese)
- [17] 张磊,何昕,魏仲慧,等. 基于星图识别的空间目标快速天文定位 [J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(11): 3074-3080.
ZHANG L, HE X, WEI Z H, *et al.*. Fast celestial positioning for space objects based on star identification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 3074-3080. (in Chinese)

作者简介:



王 军(1991—),男,吉林白山人,博士研究生,2014 年于大连理工大学获得工学学士学位,主要从事数字图像处理及光电测量方面的研究。E-mail: wangjun114@mails.ucas.ac.cn

导师简介:



何 昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事数字图像处理及光电测量等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com