

文章编号 1004-924X(2017)06-1577-10

基于星点有序集的全天球自主星图识别算法

朱海龙, 梁 斌*, 张 涛

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 为了提高在全天球自主工作模式下星图识别的成功率和鲁棒性, 本文结合 kNN 算法和有向图理论的思想, 构造出具有强约束的有序星点集模式, 提出基于有序星点集的全天球自主星图识别算法。该方法首先利用 k 近邻算法的思想, 以导航星点为中心, 对位于其一定范围内的导航星进行了分类划分。然后基于有向图理论, 以距离中心点星最近的导航星为基准, 按照顺时针顺序对分类的导航星进行排序, 构造出具有强约束特性的有序星点集作为星图识别的特征。实验结果表明: 在存在星点位置误差和伪星点的情况下, 本文提出的基于有序星点集全天球自主星图识别算法具有很强的抗噪声能力、抗伪星点干扰能力和鲁棒性。在星点质心位置达到 3 像素时, 基于有序星点集星图识别算法成功率仍然可以达到 99.8%, 比三角形识别算法和栅格识别算法的识别成功率高 16% 以上; 在存在 3 颗伪星点的情况下, 基于有序星点集星图识别算法成功率为 98.4%, 比三角形识别算法和栅格识别算法高 10% 以上。

关键词: 星图识别; 成功率; 鲁棒性; 星点有序集; 位置误差; 伪星点;

中图分类号: V249.323 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1577

All-sky automation star identification algorithm based on ordered star points set

ZHU Hai-long, LIANG Bin*, ZHANG Tao

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: liangbin@tsinghua.edu.cn

Abstract: In order to improve the success rate and robustness of all-sky automation star identification under star position error and pseudo stars, a novel star identification is proposed, which utilizes ordered star point set as star pattern. First, stars in certain range are classified by kNN algorithm as the center is a specified star, then based on the graph theory, with the nearest navigation star as reference, the classified stars are ordered in a sequence by the clockwise order. Hence, a star pattern under strong constraints is established. The numerical results imply that the proposed star identification algorithm is robustness to star position noise and false stars. Experimental results indicate that under the condition that star position error is 3 pixels, the success rate of the proposed algorithm is 99.8%, which is 16% more higher than the triangle identification algorithm and grid identification algorithm. In the case that there are 3 pseudo stars in the star image, the success rate of the proposed algorithm is 98.4%, and it is 10% more higher than the triangle identification algorithm and grid identification

收稿日期: 2017-01-19; 修订日期: 2017-02-17.

基金项目: 深圳市技术攻关项目 (JSGG20150331151358134)

algorithm. It is obviously that the proposed star identification own very high success rate and strong robustness in harsh environment.

Key words: Star pattern identification; success rate; robustness; ordered set of star points; position error; pseudo star points

1 引 言

经过半个多世纪的发展,星敏传感器已经成为航天器首选的姿态测量设备。星敏传感器通过光学系统将瞬时视场内的恒星成像在图像传感器上,然后利用星点在星图上的某种特征,与导航数据库内存储的特征进行匹配后识别出视场内的导航星,最终根据导航星的位置信息解算出航天器的瞬时姿态信息,因此如何正确识别出星图内导航星是星敏传感器技术的关键。根据星敏传感器工作模式的不同,星图识别包含全天球自主星图识别和星跟踪识别两种类型。在星敏传感器首次进入工作状态或者姿态丢失的情况下,需要进行全天球自主星图识别,来获取航天器姿态信息。在得到先验姿态信息后,星敏传感器就可以根据航天器的运动特性,通过跟踪导航星计算瞬时姿态,即进入星跟踪识别模式^[1]。

根据识别特征的不同,全天球自主星图识别方法可以分为 3 类^[2]:(1)星图特征识别方法,即根据星图中星点的位置关系构造特征,然后与全天球内所有这类特征进行匹配,识别出视场内导航星。这类方法能使用的特征主要有星三角形和星多边形,典型的算法有 Liebe 提出的三角形识别算法^[3]和 Mortari 提出的 Pyramid 识别算法^[4],其中三角形识别算法是目前应用最广泛的识别算法,也是改进最多的算法^[5]。基于星图特征的识别算法,其优点是特征直观明显,容易构造,缺点是匹配的特征维数比较低,容易产生冗余匹配,而且特征占用的存储容量大,识别速度也比较慢。为了提高识别速度,Mortari^[6]、张广军^[7]和杨君^[8]等人都提出了对导航星数据库的快速搜索算法,这些方法都不同程度地提高了导航星数据库的搜索速度,其中 Mortari 和张广军提出的搜索算法复杂度为 $O(n)$,杨君提出的搜索算法的复杂度为 $O(1)$;(2)星点特征识别方法,即将待识别导航星一定范围内恒星的几何分布作为识别特征,然后通过实际星图和导航数据库中的基进行

匹配识别出导航星。典型的星点特征识别算法有栅格算法、KMP 算法和基于 Hausdorff 距离算法。栅格算法由 Padgett 提出^[9],他将待识别导航星及其周围伴星之间的几何分布用栅格进行划分,形成只有 0 和 1 的矩阵特征,再进行星图识别。与星图特征识别方法相比较,这种方法导航星数据库存储容量低,识别成功率也比较高,但容易受到星点位置精度和伪星点的影响, Lee^[10]和 Na^[11]都对栅格算法进行了改进,以降低星等位置误差、星等以及伴星等对识别成功率的影响,从而提高了栅格算法的鲁棒性。李葆华通过把星图二值化,构建一维 0-1 字符串作为识别特征,利用 KMP 算法识别星图^[12]。这种方法不仅导航星数据库存储容量低,还能克服伪星点对识别率的影响,提高识别鲁棒性。全伟提出一种基于改进 Hausdorff 距离的星图识别算法^[13],他以伴星到待识别导航星 Hausdorff 距离组成的有序点集作为识别特征,该特征具有旋转不变特性,故在识别成功率、识别速度和抗噪声能力等方面均比原始的 Hausdorff 距离识别方法有较大幅度提升;(3)智能识别方法,即把人工智能中的算法引入星图识别,通过训练各种不同类型特征,提高星图识别的成功率,典型的算法包括神经网络算法^[14]、遗传算法^[15]和蚁群算法^[16]等。这一类的方法需要用大量的样本集训练特征,识别精度受到训练集大小和训练时间的影响,相对于星图特征识别和星点特征识别,算法复杂度比较高,特征获取难度大,因此实用性不高。

本文结合 kNN 算法思想和有向图理论基础,构造出具有强约束特性的有序星点集特征,通过对星点的分类和排序约束,在理论上提高星图识别的成功率、可靠性和鲁棒性。本文的内容安排如下:在第 2 节对有序星点集特征构造方法进行了阐述,在第 3 节对导航星数据库的构造过程进行阐述,在第 4 节对基于有序星点集的星图识别算法的具体流程进行阐述和分析,在第 5 节以仿真星图为例,利用三角形识别算法、栅格识别算法和本文提出的算法进行了对比试验和结果分析。

2 有序星点集特征构造

恒星以点的形式分布在天球的表面,也以星点成像在星敏感器的焦平面上,因此可以把星图识别抽象为点集匹配问题,即寻找一个映射关系使得星点在星图上形成的点集与星点在天球上形成的点集能够一一对应。本文通过星点位置之间的拓扑关系,构造星点的有序点集特征,使星图中的星点与天球中的星点能够实现精确匹配。

2.1 有序点集特征

假设 p_0 为起始点, p_1 是 p_0 的最近邻点,以 $p_0 p_1$ 的连线为基准,以 r 为半径顺时针扫描平面,可以得到 p_0 点的有序点集 $S(p_0, N)$, N 表示内点的个数,如图 1 所示。

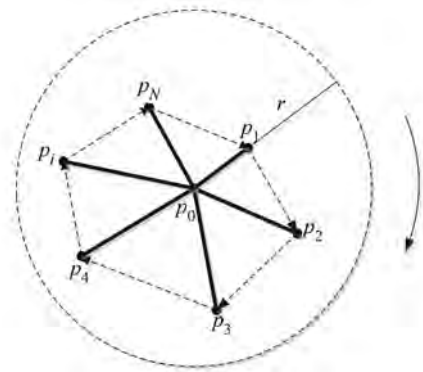


图 1 有序点集示意图

Fig. 1 Schematic map of ordered points set

$\forall p_i \in S(i=1, \dots, N)$, 定义 $d_{0,i}(p_0, p_i)$ 表示点 p_i 到目标点 p_0 的距离, $d_{i-1,i}(p_{i-1}, p_i)$ 表示任意相邻两点之间的距离, $d_{N,1}(p_N, p_1)$ 表示点 p_N 到点 p_1 的距离。如果 p_1 到 p_N 按照顺序相互连接,则可以形成一个包含以 $p_0 p_1, p_{i-1} p_i$ 和 $p_N p_1$ 连线的网状拓扑图。 $\forall p_i \in S_{adj}(i=0, \dots, N)$, p_i 是网状拓扑图的顶点,其特征 F_i 可以由与其相连接的点之间的距离表示,具体包括以下类型:

- (1) 对于 p_0 点,特征 $F_0 = \{d_{0,i}\}$, 即点 p_i 到目标点 p_0 的距离的集合表示;
- (2) 对于点 p_1 ,特征 $F_1 = \{d_{N,1}, d_{0,1}, d_{1,2}\}$, 即点 p_1 到点 p_N, p_0 和 p_2 的距离表示;
- (3) $\forall p_i(i=2, \dots, N-1)$, 特征 $F_i = \{d_{i-1,i}, d_{0,i}, d_{i,i+1}\}$, 即 p_i 到点 p_{i-1}, p_0 和 p_{i+1} 的距离表示;
- (4) 对于点 p_N ,特征 $F_N = \{d_{N-1,N}, d_{0,N}$,

$\}$, 即点 p_N 到点 p_{N-1}, p_0 和 p_1 距离表示。

$\forall i=0, \dots, N, F_i$ 表示 S 内第 i 个点的特征, 定义 $F = \{S, F_i\}$ 可以表示有序点集 S 的特征。

通过有序点集特征的构造过程可以看出,有序点集特征的本质是利用 p_1 到 p_N 所构成的模式来描述目标点 p_0 的特征。在构造有序点集特征的过程中,首先利用 kNN 算法思想,对目标点 p_0 周围点进行聚类划分,选择其中最近邻的 N 个点作为特征描述点。然后选择距离目标点 p_0 最近的点 p_1 作为参考点,以 p_1 为起始点,按照顺时针顺序把选择的 N 个最近邻点进行排序,进而构成有序点集。最后利用有序点集内两点之间的距离作为特征,构成有序星点集模式。对于每一个目标点,经过 kNN 聚类后,其最近邻的 N 个点是唯一的,距离目标点最近的点也是唯一的,在以最近点为起始点排序后,描述目标点的有序点集是唯一的,具备旋转不变的特性。有序点集是以两点之间的绝对距离作为特征构造模式的,因此具有尺度伸缩不变特性。总体来说,有序点集模式,在经过 kNN 算法和有序两种约束后,具备很强的旋转伸缩不变特性。

2.2 星点有序集特征

图 2 为星点在星敏感器上的成像原理图, 地球上的星点通过星敏感器的光学系统成像在图像传感器上。其中 $O-xyz$ 表示星敏感器的本体坐标系,其与像空间坐标系重合,星点 s_i 在星图上的坐标为 $p_i(x_i, y_i)$, 则可以得到星点 s_i 在星敏感器本体坐标系内的坐标 w_i :

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -x_i \\ -y_i \\ f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 f 是星敏感器光学系统焦距, (x_0, y_0) 表示像平面的中心点。星点 s_i 在天球坐标系的坐标为 $s_i(\alpha_i, \delta_i)$, 则星点在惯性坐标系内的坐标 v_i 可以表示为:

$$v_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

w_i 和 v_i 之间的关系可以表示为:

$$w_i = A v_i = A_{\phi} A_{\theta} A_{\alpha} v_i, \quad (3)$$

其中, A_{ϕ} 表示星敏感器本体坐标系到卫星本体坐标系之间旋转矩阵, 即星敏感器安装矩阵。 A_{θ} 表示卫星本体坐标系到轨道坐标系的旋转矩阵, 即

卫星姿态矩阵。 A_{oi} 表示轨道坐标系到惯性坐标系的旋转矩阵。

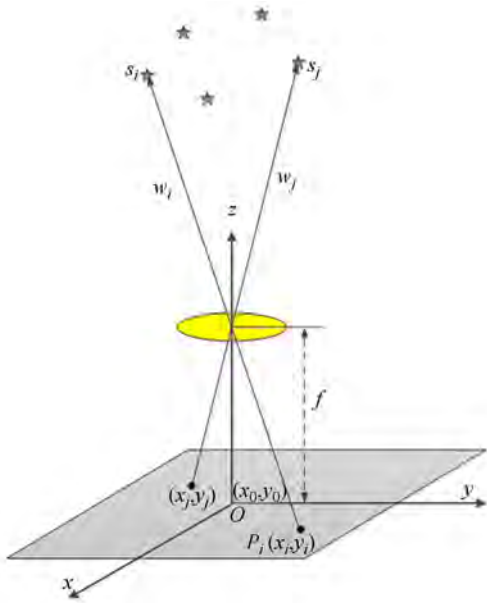


图 2 星点成像原理图

Fig. 2 Principle of star spot imaging

通过上面分析可知,星点成像的过程可以用小孔成像模型表示。根据小孔成像原理知,星点之间的夹角是不变量,对应到球面上即星点之间的角距为不变量。定义 e_{ij} 和 e_{ij}' 表示星点在惯性坐标系和星传感器本体坐标系下,星点 s_i 和 s_j 之间的夹角,则

$$e_{ij} = \arccos \left(\frac{v_i \cdot v_j}{|v_i| |v_j|} \right), \quad (4)$$

$$e_{ij}' = \arccos \left(\frac{w_i \cdot w_j}{|w_i| |w_j|} \right). \quad (5)$$

按照 2.1 节中有序点集的构造方式,用星点 s_i 代替 S 中的点 p_i , 分别用 e_{ij} 和 e_{ij}' 代替两点之间的距离,就可以得到星点 s_i 在惯性坐标系和星传感器本体坐标系下的有序星点集特征 F 和 F' , 构成如图 3 所示。

对有序星点集的特征进行讨论,可得如下结论:

(1) 在 $N=2$ 时,有序星点集构成一个有向三角形,可以视为传统三角形的改进特征;

(2) 在 $N=3$ 时,有序星点集构成一个有序四点特征,可以视为 Pyramid 算法的改进特征;

(3) 在 $N>3$ 时, F 和 F' 内可以组成星点之间构成的有向网状拓扑结构特征;

可以看出有序星点集特征能够包含三角形特征

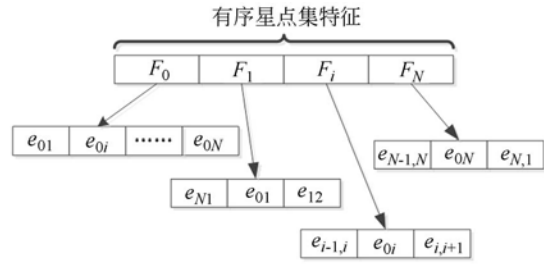


图 3 有序星点集特征

Fig. 3 Features of ordered star point set

和 Pyramid 特征,其可以通过控制 N 的大小构造出不同的星点拓扑机构,因此有序星点集特征更具备一般性和研究价值。

3 导航星数据库的构造

3.1 导航星选取原则

为了提高星图识别的成功率、识别速度以及后续姿态计算的精度,在选取导航星数目时,应该满足以下原则:(1)导航星亮度要在星敏感器的探测能力之内;(2)剔除双星和变星,尽量选取亮星作为导航星;(3)剔除角距小于一定范围的两个星中比较暗的星;(4)导航星在天球上的分布应尽量均匀,并且要尽可能使亮星靠近视场中心位置。

以 sky2000 星表为基础星表,根据上文所述的导航星选取原则,以 7 等星作为星敏感器的探测能力,共选取 11 002 颗导航星,其分布如图 4 所示。

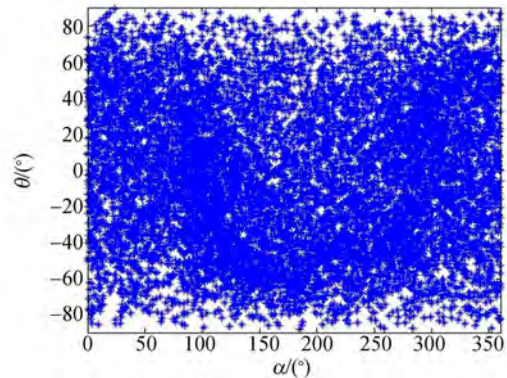


图 4 导航星分布

Fig. 4 Distribution of navigation stars

3.2 导航星数据库构造过程

导航星数据库是星传感器用来实现星图识别和姿态解算的标准依据。假设星传感器为圆视

场,视场角大小为 θ_{FOV} ,则导航星数据库具体的构造过程如下:

(1)依据公式(2)计算导航星点 $s(\alpha, \delta)$ 在惯性坐标系下的矢量 $v(x, y, z)$;

(2)选择基础导航星库中任意星点为 s_0 ,以 r ($r \leq \theta_{FOV}$)为半径,通过 kNN 算法寻找 r 范围内星点 s_0 最近邻的 N 颗星并计算出它们到 s_0 的角距 e_{0i} ;

(3)按照有序点集特征的构造方式,以距离 s_0 最近的星点 s_1 为基准,可以得到星点有序集 $s = \{s_i\}, (i=0, \dots, N)$,计算按照顺序连接的相邻两个星点之间的角距 $e_{i,i+1}$;

(4)构造得到每个星点 s_i 的特征 F_i ,进而得到导航星点的有序星点集特征 F 。

经过筛选后得到 M 颗导航星,每颗导航星有 N 颗近邻星点,则可以得到导航星数据库,具体存储格式和内容如图 5 所示。

导航星数据库			
星号	赤经	赤纬	有序星点集特征
编号1	α_1	δ_1	$F(1)$
⋮	⋮	⋮	⋮
编号 <i>i</i>	α_i	δ_i	$F(i)$
⋮	⋮	⋮	⋮
编号 <i>M</i>	α_M	δ_M	$F(M)$

图 5 导航星数据库存储的格式及内容

Fig. 5 Storage format and content of navigation star database

为了减小导航星数据库的存储量,每颗星的有序星点集特征存储内容如图 6 所示。

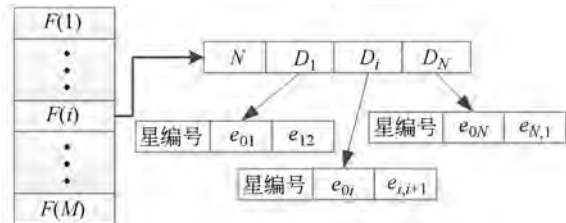


图 6 有序星点集存储内容

Fig. 6 Storage content of ordered star point set

有序星点集特征第 1 列存储最近邻星的数量 N ,以字符格式存储,占用 1 个字节。第 2 列至最

后一列存储近邻星的信息,对于每一颗近邻星,需要存储对应的星编号,到星点 s_0 的角距 e_{0i} 和到下一颗星的角距 $e_{i,i+1}$ 。星号使用 int 位整数存储,占用 4 个字节,星点之间距离使用 float 精度的小数存储,占用 4 个字节。因此每个有序星点集需要的存储空间为:

$$N_F = 1 + 4 \times 3N = 12N + 1. \quad (6)$$

星点的赤经和赤纬也使用 float 精度的小数存储,占用 4 个字节,因此导航星数据库每 1 行需要占用的字节数可以表示为:

$$N_{col} = 4 \times 3 + N_F = 12N + 13. \quad (7)$$

对于有 M 颗导航星的数据库,需要占用的存储空间 N_{total} 可以表示为:

$$N_{total} = M \cdot N_{col} = M(12N + 13), \quad (8)$$

其中 N_{total} 的单位为 Bytes。

以 3.1 选取的 $M=11\ 002$ 导航星为例,在 $N=4$ 的情况下,导航星数据库需要占用的存储容量为:

$$N_{total} = M \cdot N_{col} = M(12N + 13) = 11\ 002 \times (12N + 13) = 671\ 122(\text{Bytes}). \quad (9)$$

4 星图识别过程

星图识别是星点在星图中特征与导航数据库中特征相匹配的过程,输入是星图中星点的位置,输出是导航星在天球坐标系的单位矢量。在实际星图中,由于受到各种因素的干扰,星图中可能会存在比较大的噪声以及干扰目标形成的伪星点。本文通过设计有序星点集特征,利用 kNN 算法搜索近邻星并且构造有序星点模式,以提高特征的抗噪声能力以及降低干扰目标形成的伪星点对星图识别的影响,从而提高星图识别的可靠性和鲁棒性。

基于有序星点集特征的全天球自主星图识别算法的流程如图 7 所示,具体实现步骤为:

(1)计算星图中星点到星图中心点的距离并按照长度进行排序,获取距离中心点最近的星点 p_0 ,及其位置 $p_0(x_0, y_0)$;

(2)将星图中星点 p_i 按照公式(1)转换为星敏感器本体坐标系下的单位矢量 w_i 。利用 kNN 算法搜索半径 r 范围内的 N^* 个近邻星点及其对应角距;

(3)选择距离 p_0 最近的星点 p_1 ,并且按照有

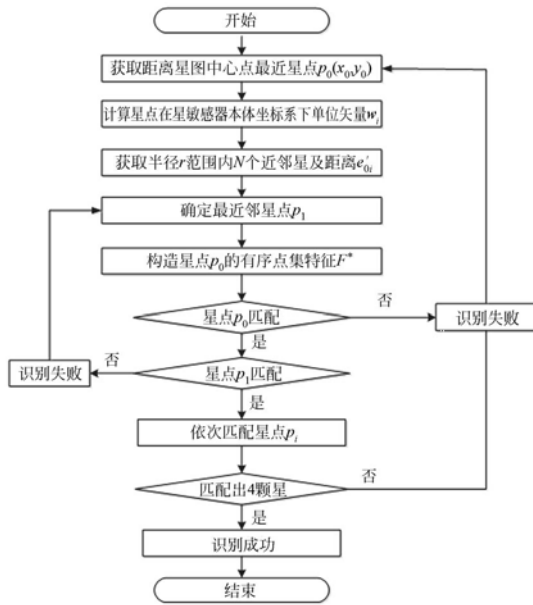


图 7 星图识别流程图

Fig. 7 Flow chart of star identification

序星点集特征的构造方式,得到星点 p_0 点及其近邻 N 颗星组成的星图特征 F^* ;

(4)对星点 p_0 进行匹配。匹配星图特征 F^* 中 e_{0i} 与导航星数据库特征 F 中 e_{0i}' 。如果距离的成功匹配数量大于等于 2 个,则判定匹配成功,下一步对 p_1 进行匹配。否则,视 p_0 为干扰目标形成的伪星点,删除该星点并返回步骤(1)重新选择 p_0 点和特征 F^* ;

(5)对星点 p_1 进行匹配。将星图中 p_1 及其近邻星点 p_2 和 p_N 与导航星数据库中 s_1 及其近邻星点 s_2 和 s_N 的特征进行匹配。如果匹配成功,则进入下一步。否则,认为 p_1 匹配失败,删除该星点,返回步骤(3)重新确定 p_1 和特征 F^* ;

(6)对剩余星点进行匹配。将星图中 p_i 及其近邻星点 p_{i-1} 和 p_{i+1} 与导航星数据库中 s_i 及其近邻星点 s_{i-1} 和 s_{i+1} 的特征进行匹配。如果匹配成功,则继续对第 $(i+1)$ 颗星点进行匹配,否则判定第 i 颗星为干扰目标形成的伪星点,删除该星点后继续对第 $(i+1)$ 颗星进行匹配,直到有序星点集内所有星都匹配完。如果在该有序星点集内能够匹配成功 4 颗导航星,则认为该星图识别成功,否则认为该图识别失败,进入步骤(1),重新选择 p_0 继续匹配,直到完成整幅星图的匹配。

本文在构造有序星点集特征时,首先利用 kNN 算法对星点进行分类,使得只有在半径 r 范

围内的星点才能构成匹配特征,从而减少了匹配特征的数量。星点分布的稀疏特性能够保证 kNN 的星点特征分类具有比较好的效果。然后,基于有向图思想,对分类后的星点进行有序排列,相对于没有排序的特征,有序星点集特征具有更强的约束能力,可以大大降低误匹配概率。此外,如果存在干扰目标形成的伪星点,只需要利用匹配星点在有序星点集特征中与其相邻星点之间的距离就可以判断该点是否是伪星点。因此本文提出的有序星点集特征星图匹配具有很强的鲁棒性。

由于 p_0 和 p_1 点是构造有序星点集特征的基础,因此它们能否成功匹配是星图识别的关键,需要单独进行匹配。如果 p_0 或者 p_1 是干扰目标形成的伪星点,则需要删除该点,重构有序星点集后再进行匹配。对于有序星点集内的其他点,如果存在干扰目标形成的伪星点,则可以通过识别过程进行删除。

5 仿真实验结果分析

5.1 实验约束条件

仿真实验中,选取 sky2000 星表作为基础星表,以 STAR1000 图像传感器作为成像器件,选用三角形识别算法^[3]和栅格识别算法^[9]作为对比算法。星敏传感器仿真实验参数设置如下:

星敏传感器视场角: $12^\circ \times 12^\circ$

像平面分辨率: $1\ 024 \times 1\ 024$

像元尺寸: $0.015\ \mu\text{m}$

恒星探测能力: 7.0 等星

扫描半径: $r=5^\circ$

遍历天球上的导航星,在半径 $r=5^\circ$ 的范围内导航星的数量分布情况如图 8 所示。可以看出,视场内导航星数量大部分集中在 6 颗以上,40 颗以下。根据统计结果,视场内导航星数量小于 5 颗的概率为 0.67%。

在实际星图中,受噪声的影响,实际星点位置与理想星点位置存在一定程度的误差。此外星图成像过程中由于受到干扰目标的影响,进而可能在星图中出现伪星点,这两点是影响星图识别成功率的重要因素。本文重点讨论这两种情况下,基于有序星点集星图识别算法的识别情况。

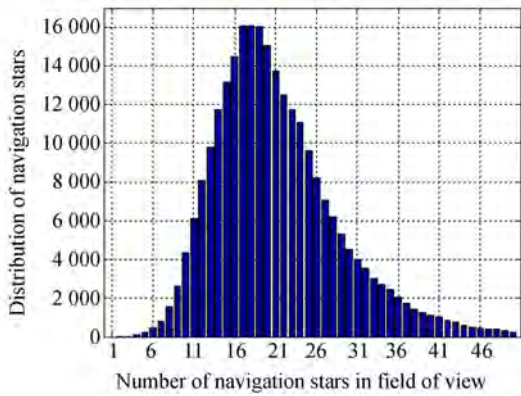


图 8 视场内导航星数量分布

Fig. 8 Distribution of navigation stars in the FOV

5.2 星点位置有误差条件下的星图识别

通过蒙特卡洛仿真方法,随机获取 1 000 个视场指向并且生成仿真星图,对星点位置加上 0.1~3 pixel 的位置误差。分别使用三角形识别算法,栅格识别算法和本文提出的算法进行识别,得到的统计结果如图 9 所示。

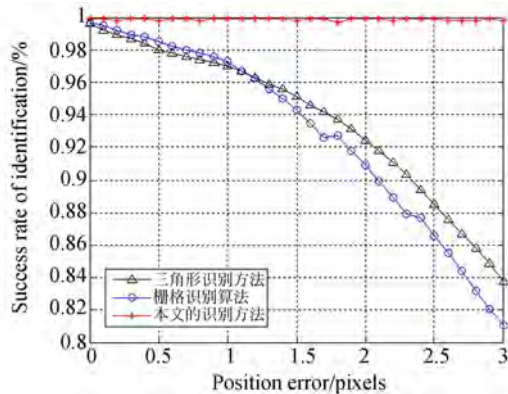


图 9 星点质心位置误差对识别成功率影响

Fig. 9 Influence of centroid position error on identification success rate

从图 9 中可以看出,随着星点位置误差的增大,三角形识别算法和栅格识别算法的识别成功率逐渐下降。在位置误差是 2 pixel 的时候,三角形识别方法的成功率为 92.4%,栅格识别算法的识别成功率为 90.9%,而本文提出的基于有序星点集的星图识别算法的识别成功率为 99.9%。在 3 pixel 星点位置误差的情况下,三角形识别方法的成功率为 83.3%,栅格识别算法的识别成功率为 81.1%,而本文提出的基于有序星点集的星图识别算法的识别成功率为 99.8%,比三角形识别算法和栅格识别算法高 16% 以上。可以看出

本文提出的算法受星点位置误差的影响很小,具有很强的鲁棒性。需要说明的是本文算法在计算过程中,将不能正确识别和冗余识别均认为识别失败。

三角形识别算法利用三个星点构成识别特征,特征维数相对较低,随着星点位置误差的增大,三角形识别特征的唯一性降低,出现大量的冗余匹配和误匹配,导致星图识别成功率迅速降低。栅格识别算法通过划分栅格对星图进行编码,如果星点位置出现在超过一定数量的错误栅格内就会导致识别失败,因此栅格算法本身对于星点位置误差有较强的敏感性,随着星点位置误差的增大,识别成功率快速下降。本文提出的基于有序星点识别算法,通过 kNN 方法和有序特性约束识别特征,在理论上提高了识别特征的唯一性。通常情况下,有序星点集内星点数量大于 5 颗,识别特征维度比较高,可以减少冗余匹配和误匹配的概率。因此随着星点位置误差的增大,本文提出的算法仍然有很高的识别成功率,具有很强的鲁棒性,并且随着 N 的增加,鲁棒性也能进一步提高。

5.3 存在伪星点条件下星图识别

通过蒙特卡洛仿真方法,随机获取 1 000 个视场指向并且生成仿真星图,在每张星图中加入 1~3 颗数目不等的伪星点,分别使用三角形识别算法,栅格算法和在 N=4 情况下有序星点集特征识别算法进行识别,得到的统计结果如图 10 所示。

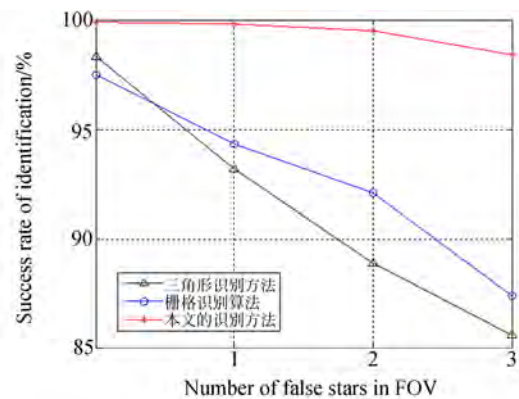


图 10 伪导航星点对识别成功率影响

Fig. 10 Influence of false stars on identification success rate

从图 10 中可以看出,当存在伪星点的时候,三角形识别算法和栅格识别算法的成功率都比较低,并且随着伪星点数量增加识别成功率迅速下降。当出现 2 颗伪星点时,三角形识别方法的成功率为 88.9%,栅格识别算法的识别成功率为 92.1%,本文提出的基于有序星点集识别算法的识别成功率为 99.5%。当出现 3 颗伪星点时,三角形识别算法成功率为 85.6%,栅格识别算法的识别成功率为 87.4%,本文提出的基于有序星点集识别算法的识别成功率为 98.4%。可以看出,本文提出的算法在受到伪星点影响的情况下具有很高的识别成功率和很强的鲁棒性。

在视场中存在伪星点的情况下,本文提出的算法具有很强的鲁棒性,识别成功率明显优于三角形识别算法和栅格识别算法。这主要是由于采用三角形识别算法时,会在视场中产生“伪三角形”,进而会出现误识别,导致识别成功率下降,随着伪星点数量的增多,“伪三角形”的数量也增多,出现误识别的概率也会增加,因此三角形算法的识别率随着伪星点的增加而迅速降低。在使用栅格识别算法时,由于伪星点一般是由其他卫星或者比较亮的物体发射形成的,所以伪星点很可能被选为栅格识别算法中的主星点或者最近邻伴星,导致星图识别的模式错误,最终使星图识别成功率降低,随着伪星点数量的增加,伪星点被选作主星或者最近邻伴星的概率增加,导致星图识别成功率迅速降低。在使用本文提出算法时,由于本文提出的有序星点集模式,通过 kNN 算法和有序两种方式,使得识别模式有很强的唯一性和约束能力,在本文算法的识别过程中,已经考虑到伪星点可能为主星点、参考星点和其他星点三种情况,并且在识别过程中进行了判断,因此可以非常有效地降低伪星点对识别模式的干扰,保证星图识别的成功率和鲁棒性。

5.4 对不能识别情况的分析

本文提出的基于星点有序点集的星图识别算法的部分识别失败星图如图 11 所示。可以看出导致识别失败的主要原因是星图内导航星数量过少或者是导航星分布在星图的边缘附近。对于星图中星点比较少少的情况,星图中可能无法构成星点有序点集的特征,导致星图无法识别。由于本文提出的识别算法在识别过程中,需要选择靠近星图中心的星作为参考星,在星点分布全部都靠

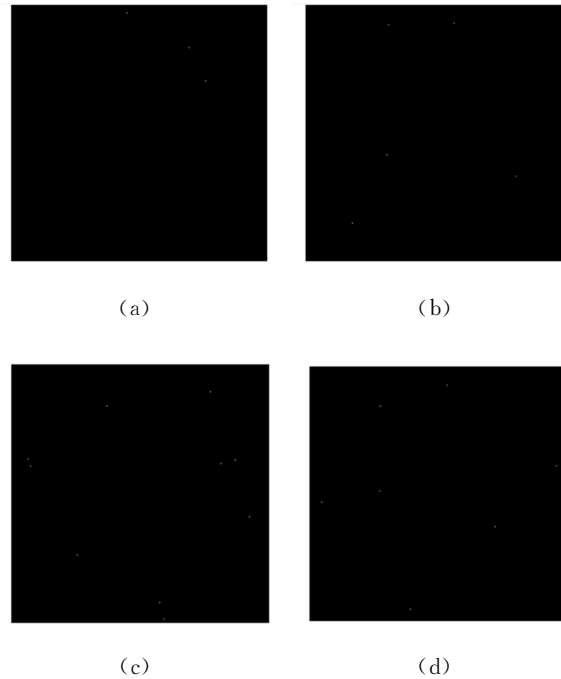


图 11 识别失败的仿真星图

Fig. 11 Failed identification of simulation star image

近边缘的情况下,会导致需要构成有序星点集模式的星点出现在星图外,导致星图识别失败。因此,可以通过增加导航星的数量和控制构成有序星点集内星点的数量,进一步提高星图识别的成功率。

5.5 识别时间和数据库容量分析

在本文的试验条件下,三角形识别算法,栅格识别算法和基于有序星点集的识别算法所需要的识别时间和导航星数据库的容量如表 1 所示。

表 1 识别时间和数据库容量

Tab. 1 Identification times and capacities of database

方法	识别时间/ms	导航星数据库容量/KB
三角形识别	165.83	1 328
栅格识别	147.29	389
有序星点集识别	89.64	672

从表 1 可以看出,在同等条件下,本文提出的有序星点集识别算法的识别速度优于三角形识别算法和栅格识别算法,而导航星数据库的存储容量比三角形识别算法少,但是比栅格识别算法多。根据 3.2 节的说明,在导航星数量一定的情况下,有序星点集识别算法的数据库存储容量跟有序星点集内星点数量是线性相关的。

6 结 论

为了提高受星点位置误差和伪星点影响下全天球自主星图识别的成功率和鲁棒性,本文提出了基于有序星点集的星图识别算法。该算法通过构造具有强约束特性的有序星点集特征,在理论上提高了识别特征模式的唯一性和可靠性。通过仿真实验对比分析了三角形识别算法,栅格算法和本文提出的基于有序星点集识别算法的性能。结果表明:随着星点位置误差的增大,三角形识别算法和栅格识别算法的识别率迅速下降,本文提

出识别算法的识别率受到的影响比较小。在星点位置误差达到 3 pixel,本文提出的基于有序星点集的星图识别算法的识别成功率比三角形识别方法和栅格识别算法的高出 16% 以上。在存在伪星点的情况下,随着伪星点数量的增多,三角形识别算法和栅格识别算法的识别率迅速下降,而本文基于有序星点集识别算法的识别成功率受到的影响很小。在存在 3 颗伪星点的情况下,有序星点集识别算法的识别成功率比三角形识别算法和栅格识别算法高出 10% 以上。此外,本文还对识别失败的情况进行了分析和讨论,为本文算法的进一步优化和研究提供参考。

参考文献:

- [1] 张广军. 星图识别[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
ZHANG G J. *Star Identification* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 梁斌,朱海龙,张涛,等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 16-29.
LIANG B, ZHU H L, ZHANG T, *et al.*. Research status and development tendency of star tracker technique [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 16-29. (in Chinese)
- [3] LIEBE C C. Pattern recognition of star constellations for spacecraft application [J]. *IEEE Aeronautics Electronic System Magazine*, 1992, 7(6): 34-41.
- [4] MORTARI D, SAMAAAN M A, BRUCCOLERI C. The pyramid star identification technique [J]. *Navigation*, 2004, 51(3): 171-184.
- [5] 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)
- [6] MORTARI D, NETA B. K-vector range searching techniques [J]. *Adv. Astronaut. Sci*, 2000, 105: 449-464.
- [7] GUANG J Z, WEI X, JIANG J. Full-sky autonomous star identification based on radial and cyclic features of star pattern[J]. *Image Vision Computing*, 2008, 26 (7): 891-897.
- [8] 梁斌,杨君,宋靖雁,等. 一种快速搜索导航星表的方法,中国,CN101995248A[R]. 2011.
LIANG B, YANG J, SONG J Y, *et al.*. A fast method for searching star catalog,CN:101995248A [R]. 2011. (in Chinese)
- [9] PADGETT C, DELGADO K K. A grid algorithm for star identification [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1997, 33(1): 202-213.
- [10] LEE H. Star pattern identification technique by modified grid algorithm [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43 (3):1112-1116.
- [11] MENG N, ZHANG D N, JIA P F. Modified grid algorithm for noisy all-sky autonomous star identification [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 2009, 45(2):516-522.
- [12] 李葆华,张迎春,许士文,等. 用KMP算法进行星敏感器星图识别的改进方法[J]. 光电工程, 2004,31(2): 19-22.
LI B H, ZHANG Y CH, XU SH W, *et al.*. Improvement for star map recognition of star sensor with KMP algorithm [J]. *Opto-Electronic Engi-*

- neering, 2004, 31(2):19-22. (in Chinese)
- [13] WEI Q, LIANG X, JIAN CH F. A new star identification algorithm based on improved hausdorff distance for star sensors [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(3): 2101-2109.
- [14] 张少迪, 王延杰, 孙宏海. 三角剖分以及径向基函数神经网络在星图识别中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2):395-402.
- ZHANG SH D, WANG Y M, SUN H H. Application of triangulation and RBF neural network to star pattern recognition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):395-402. (in Chinese)
- [15] PALADUGU L, WILLIAMS B G, SCHOEN M P. Intelligent star pattern recognition for attitude determination: the "Lost in space" problem [J]. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2006, 3(11): 538-549.
- [16] QUAN W, FANG J C. A star recognition method based on the adaptive ant colony algorithm for star sensors [J]. *Sensors*, 2010, 10(3): 1955-1966.

作者简介:



朱海龙(1987—),男,山东菏泽人,博士研究生,2009年于西北工业大学获得学士学位,主要从事星敏传感器技术、航天器健康管理系统等方面的研究。E-mail: zhu-hl09@mails.tsinghua.edu.cn



梁斌(1968—),男,江西景德镇人,教授,博士生导师,1989年、1991年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位,1994年于清华大学获得博士学位,主要从事微小卫星技术、导航制导与控制、机器人运动控制等方面研究。E-mail: bliang@tsinghua.edu.cn