文章编号 1004-924X(2017)01-0208-09

基于最大内角的三角形星图识别算法

张同双[1,2],郭敬明[1,2,3*],柏 杨[4],刘 冰[1,2],周海渊[1],王二建[1],张世学[3]

(1. 中国卫星海上测控部,江苏 江阴 214431;
2. 飞行器海上测量与控制联合实验室,江苏 江阴 214431;
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
4. 吉林大学 生物与农业工程学院,吉林 长春 130000)

摘要:针对传统三角形星图识别算法的不足,本文提出了一种不依赖星等信息的全天球自主快速三角形识别算法。通过构建三角形最大内角及其两边作为匹配特征三角形,建立了全天球导航特征库,对生成的特征库按最大内角值构造散列函数,并分块存储。识别过程中,采用"边-角-边"原理进行匹配。首先,根据最大内角的观测值实现子块的快速定位,然后,在子块中对观测三角形的两边进行星角距快速匹配,缩小了角距匹配的范围,提高了识别速度。试验表明,星点位置噪声低于 2 个像元时,识别率优于 98.08%;观测星数等于 10 颗,特征库分块总数为 1 024 时,平均识别时间为 13.1 ms。与现有三角形识别算法相比,该算法在识别速度、识别率及抗星等噪声能力等方面具有明显优势。

关 键 词:星敏感器;星图识别;三角形算法;特征三角形
中图分类号:TP394.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20172501.0208

Star identification algorithm based on the maximum interior angle in triangle

ZHANG Tong-shuang[1,2], GUO Jing-ming[1,2,3*], BAI Yang[4],
LIU Bin[1,2], ZHOU Hai-yuan[1], WANG Er-jian[1], ZHANG Shi-xue[3]

(1. *China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin* 214431, *China*;
2. *Joint Laboratory of Ocean-based Flight Vehicle Measurement and Control, Jiangyin* 214431, *China*;
3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun* 130033, *China*;
4. *College of Biological and Agricultural Engineering of Jilin University, Changchun* 130000, *China*)
** Corresponding author, E-mail: gjm441@163.com*

Abstract: As the traditional triangle star identification algorithm is insufficient, this paper proposed a fast all-sky autonomous triangle algorithm with star magnitude-independent. By structuring the maximum interior angle and two sides as a matching feature triangle, the algorithm established celestial navigation feature library which was constructed to be a hash function according to the maximum interior angle and stored into sub-blocks. 'Edge-angle-edge' matching mode was adopted in

收稿日期:2016-08-12;**修订日期**:2016-09-12.
基金项目:航天科学基金资助项目(No. 2011-JS-000675)

the process of star identification. First, adopt the hash search to achieve rapid positioning of sub-blocks in terms of observations of the maximum interior angle, and then quick matching of star argument was conducted on both sides of the observed interior angle, which would further to narrow matching scope of the argument and improve identification speed. Experiments indicate that identification rate of the algorithm can exceed 98.08% when star point noise is lower than 2 pixels and average identification time is 13.1 ms when observed stars number equals to 10 and the sum of sub-blocks in feature library is 1 024. Compared with current triangle identification algorithms, this algorithm has obvious advantages in identification speed, identification rate and the ability of resisting star magnitude noise.

Key words: star sensor; star identification; triangle algorithm; feature triangle

1　引　言

星敏感器是目前已知精度最高的载体姿态敏感器。星敏感器是通过测量恒星指向来解算载体姿态的。其关键技术是星图识别，而识别速度、识别率及鲁棒性是衡量星图识别算法性能的关键指标。基于星角距的三角形算法是工程上最成熟的识别算法[1-2]，它以两两之间的星角距作为特征量进行匹配，由于该方法特征维数低，每个观测三角形至少需比较三次[3]，故搜索时间长。于是，学者们围绕减小特征库的数量和缩短搜索时间两个方面展开研究，提出了一些改进算法。如文献[2]提出了一种高鲁棒性的“金字塔”星图识别算法，当星图中包含 4 颗以上导航星时，其能给出正确结果的概率接近 100%，但算法对星图中导航星的个数要求较高，且识别速度受星位置误差的影响较大。金字塔算法的另一个不足是，在计算机字长有限时，星矢量内积在小角距范围内的区分度欠佳。文献[4]将星角距按大小分块存储，并采用基于状态标识的搜索方法，提高了搜索速度。但为了减小特征库的容量，该方法剔除了稠密天区中的较暗恒星，因而丧失了导航星表的完整性。文献[5-6]提出了基于主星的三角形识别算法，其将星图中最亮的两颗恒星作为主星对，将其它恒星作为辅助导航星，从而可以极大地减少导航特征库的容量，缩短搜索时间，但当主星对星等相差较小时该类算法的识别率会严重降低，特别是当星敏感器工作于大气层内时，由于气象等原因，可能会导致视场内的主星缺失，或使主星的亮度低于其它观测星，从而导致识别率降低，甚至整幅星图不能识别。针对主星算法的不足，Domenico 在大星库基础上提出了不依靠亮度的三角形改进算法，由于其对多个三角形进行角距匹配，精度较普通三角形法大大提高，保证了识别的可靠性，该算法的不足是识别速度较慢[7]。此外，基于其它具有平移、旋转不变特性的几何特征如惯性特征比[3]、三角形内切圆半径[8]、外接圆半径[9]等的三角形算法，在识别率和识别速度方面均取得了不错的效果。然而，为了减少导航特征库容量，在生成特征库时，这些算法均剔除了稠密天区的部分导航星，因而丧失了完整性，在星敏感器视场较小时，问题将会突显。

本文提出了一种基于最大内角（Maximum Interior Angle of Triangle）散列函数（Hash Function）的三角形识别算法。首先根据导航星表，构建满足星角距要求的特征三角形，该特征三角形以三角形最大内角为主特征值，以相邻两边的星角距为辅助特征值，对生成的特征三角形按最大内角构造散列函数，并分块存储。

星图识别过程就是在导航特征库中查找一个与观测特征唯一匹配的过程。查找的方法有很多，可以采用顺序查找、分块查找、折半查找等，但这些查找方法都需要经过很多次比较之后才能对观测特征进行定位，它们的算法复杂度分别为 $O(N/2)$，$O(\sqrt{N})$，$O(\log_2 N - 1)$。散列法（Hashing）是数据结构中最快的一种查找方法，其原理是将存储内容作为映射函数的输入，存储位置作为映射函数的输出，不需要任何比较，其时间复杂度接近于 $O(1)$。将存储内容关键字 key 作为自变量，通过一个确定的函数关系 H（即散列函数），计算出相应的函数值 $H(\text{key})$，并将其作为该存储内容的存储位置。识别过程中，根据最大内角的观测值实现子块的快速定位，采用“边-角-边”原理进行星图匹配，每个三角形的识别仅在相应的子块内完成，因而提高了识别速度。

另外本文算法在构建导航特征库时，没有采用视星等作为匹配特征，这是因为人眼与光电器件所能接收的光谱范围以及敏感度不同，故视星等是种不稳定的识别特征，恒星星等误差较大。由于特征库中不含不可靠的星等信息，且三角形最大内角分布范围宽、区分度优，因而提高了识别率。最后对算法进行了验证，实现了 6.5 Mv 星的快速识别。

2　导航特征库的构建

2.1　导航特征值的选取

导航特征库的构建是星图识别的基础。三角形星图识别中，一般选择如边长、对角、高、面积、周长等几何参数作为导航特征值，这些特征具有比例、平移、旋转不变性，因此直观性强，计算简单[10]。但它们一般不是一一对应关系，需要引入新的特征或特征的组合加以筛选。本文根据“边-角-边”的三角形识别算法构造特征三角形。

三角形三个内角之和为 180°，因此三角形任意内角 θ 均满足 $0°<\theta<180°$。为了缩小内角范围，本文选择三角形的最大内角 $\theta_{\max}$ 作为导航三角形的特征值，易知 $60°\leqslant\theta_{\max}<180°$，即 $\theta_{\max}$ 分布范围为 120°，分布范围宽，区分度优。如图 1 所示。

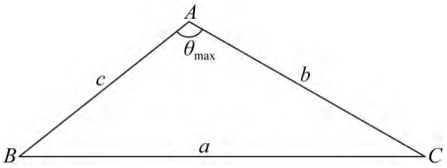


图 1　三角形最大内角

Fig. 1　Maximum interior angle of triangle

对于如图 1 所示的 $\triangle ABC$，假设其三边长分别为 a、b 及 c，且 $a\geqslant b\geqslant c$，则根据余弦定理，三角形最大内角的计算公式为：

$$\theta_{\max}=\arccos\left(\frac{b^2+c^2-a^2}{2bc}\right). \tag{1}$$

具体数据结构为：

```
Struct Triangle{
    short   IDmax;//最长边所对的星表(点)号
    short   IDsec;//次长边所对的星表(点)号
    short   IDthi;//最短边所对的星表(点)号
    float   DisSec;//次长边边长
    float   DisThi;//最短边边长
    float   ThetaMax;//最大内角
};                                          (2)
```

对于导航(或观测)三角形 $\triangle ABC$ 来说，假设星点 A、B、C 的星表号(或星点号)为 A、B、C，两两之间的参考星角距(或观测星角距)分别为 AB、AC 及 BC，最长边、次长边及最短边分别为 a、b 及 c，则可按表 1 所示的判定方法生成基于最大内角的三角形特征库。

表 1　特征三角形判定方法

Tab. 1　Determination method of feature triangle

a	b	c	特征三角形
BC	AB	AC	$[A\ \ C\ \ B\ \ b\ \ c\ \ \theta_{\max}]$
BC	AC	AB	$[A\ \ B\ \ C\ \ b\ \ c\ \ \theta_{\max}]$
AC	BC	AB	$[B\ \ A\ \ C\ \ b\ \ c\ \ \theta_{\max}]$
AC	AB	BC	$[B\ \ C\ \ A\ \ b\ \ c\ \ \theta_{\max}]$
AB	BC	AC	$[C\ \ A\ \ B\ \ b\ \ c\ \ \theta_{\max}]$
AB	AC	BC	$[C\ \ B\ \ A\ \ b\ \ c\ \ \theta_{\max}]$

三边长即为任意两星 i、j 间的星角距，构建导航三角形时，参考星角距 d_{ij} 的计算公式为：

$$\boldsymbol{d}_{ij}=\arccos(\boldsymbol{V}_i\cdot\boldsymbol{V}_j/(\|\boldsymbol{V}_i\|\times\|\boldsymbol{V}_j\|)), \tag{3}$$

式中：“·”为矢量点积运算符；“$\|\boldsymbol{x}\|$”为 x 的范数；$\boldsymbol{V}_i$、$\boldsymbol{V}_j$ 分别为恒星 i、j 的参考矢量；假设恒星 i、j 的赤经赤纬分别为 (α_i,δ_i) 和 (α_j,δ_j)，则有：

$$\begin{cases}\boldsymbol{V}_i=[\cos\alpha_i\cos\delta_i\quad\sin\alpha_i\cos\delta_i\quad\sin\delta_i]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{V}_j=[\cos\alpha_j\cos\delta_j\quad\sin\alpha_j\cos\delta_j\quad\sin\delta_j]^{\mathrm{T}}\end{cases}. \tag{4}$$

2.2　导航三角形的构建与索引

导航特征库来源于导航星表，因此构建导航特征库之前，需先构建导航星表。导航星表包含了导航星的星表号、赤经、赤纬、视星等信息，这些信息是构建导航特征库和后续姿态确定的基础信息。导航星表的构建可采用星等阈值法(Visual Magnitude Threshold，VMT)，并对双星进行处理[1]。

当导航星表构建完成后，即可根据表 1 所示的方法构建基于最大内角的特征三角形。假设导航星表中共有 n 颗导航星，则理论上 n 颗星可以构建 C_n^3 个特征三角形，结合星敏感器的具体视场(Field of View，FOV)及离焦特性，可以按下式进行筛选：

$$\xi<d_{ij}\leqslant d_{\max}, \tag{5}$$

式中：ξ 为星敏感器像面弥散斑所对应的角度，$d_{\max}$ 为所允许的最大星角距，可取对角视场或视场进行计算。前者包含视场中所有可能出现的三角形，但存储容量偏大，因而匹配速度低；后者存储容量小、匹配速度快，但可能会影响识别率，此时可通过选择合适的主观测三角形加以解决。$d_{\max}$ 分别取对角视场和视场时，建立的导航特征库总数分别为 5 458 720 条和 1 399 977 条，文件大小分别为 223 MB 和 56.4 MB。

由于本文是将导航特征库按三角形最大内角 $\theta_{\max}$ 进行升序排列，并分成 N 块存储的，因此，需要构造散列函数来确定最大内角 $\theta_{\max}$ 与分块存储位置的关系。由于 $0 \leqslant \theta_{\max} - 60 < 120$，如果将 120°范围分为 N 块，则每块的索引范围为 $120/N$，因此，散列函数可构造为：

$$H(\theta_{\max}) = \mathrm{fix}\left(\frac{N \times (\theta_{\max} - 60)}{120} + 1\right), \quad (6)$$

式中：$\mathrm{fix}(x)$ 表示 x 向零最近的方向取整，分块总数 N 需要根据最大内角匹配误差门限确定。

具体流程如图 2 所示，首先从导航星表中读取三颗星，计算两两之间的星角距，判断是否满足星角距要求，满足则按表 1 所示的方法构建导航三角形。

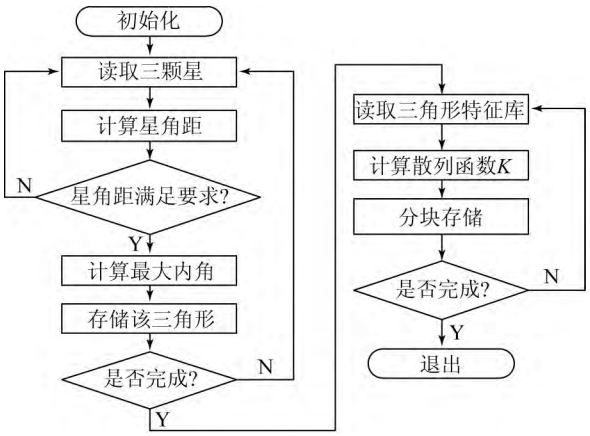


图 2　导航三角形构建流程

Fig. 2　Flow chart of guide triangle generation

影响三角形最大内角精度的主要因素是星点定位误差。星点定位误差是通过影响星角距测量精度最终影响最大内角测量精度的。星点定位误差对星角距及最大内角的影响可以通过仿真方法分析。当星点定位误差为 2 pixel 时（视场为 8°，图像传感器像元数为 1 024 pixel×1 024 pixel），星点定位误差对星角距测量精度的影响如图 3 所示，星角距对最大内角测量精度的影响如图 4 所示。

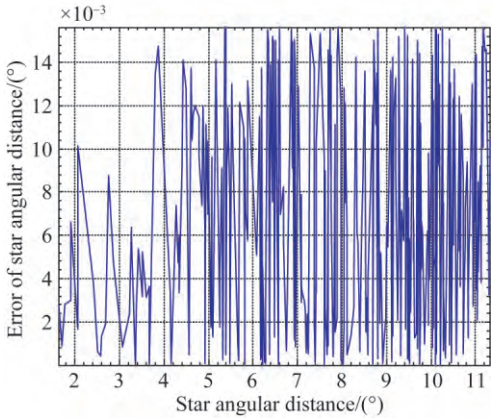


图 3　星点定位误差对星角距测量精度的影响

Fig. 3　Influence of position error on measurent precision of star angular distance

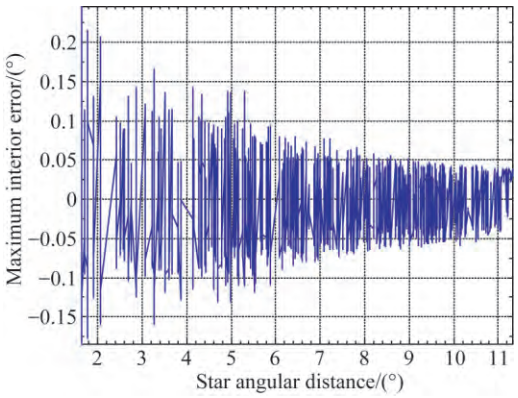


图 4　星角距对内角精度的影响

Fig. 4　Influence of star angular distance on precision of interior angle

由图 3 可知，当星点定位误差为 2 pixel 时，星角距测量误差平均值为 0.013 808°，标准差为 0.010 356，且表现为随机噪声特性。由图 4 可知，最大内角测量误差随三角形最长星角距的增加而减小，因此构建特征三角形与观测三角形时，尽量避免选用小三角形。

图 5 是根据已构建的部分导航特征库（最大内角升序排列）所得到的最大内角曲线图。由图 5 可知，所构建的特征库中，最大内角并无明显的台阶现象，最大角趋近于 180°，因而当 $\theta_{\max}$ 出现在子块 K 的前段或后段时，可能会出现满足要求的特征三角形不在该子块的现象，此时可将相邻子块纳入匹配区间。由图 5 还可看出，部分三角形最大内角的最大值无限接近 180°（其中 79.648 557°≤

$\theta_{max}\leqslant 179.999\ 996°$的数据共有 9 065 组），然而这些特征三角形并不多见，且会因三角形的形状欠佳而导致识别率下降，因此构建特征三角形时，可以适当限制 θ_{max} 的最大值，以提高匹配速度与识别率。

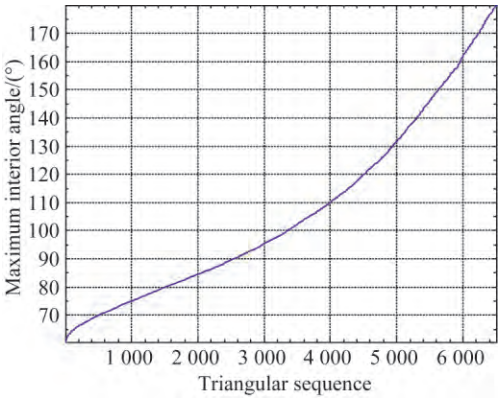


图 5　部分特征三角形的最大内角

Fig. 5　Maximum interior angles of partial feature triangles

当星敏感器的极限探测星等相对较高时，导航星数据库相对较大，此时，直接构建导航三角形将是个异常繁琐耗时的工作，且构建的特征库容量巨大。对此，可以考虑采用重叠球矩法将整个天球分割成若干个局部重叠天区，再采用并行算法生成导航三角形，以加快特征库构建的速度。

3　基于最大内角的三角形匹配算法

3.1　观测三角形的构建

本文采用基于公共星对的多三角形识别算法以加快匹配速度。由以上分析可知，星点定位精度对内角测量精度具有较大的影响，因此构建观测三角形时，应尽量选取星角距较大的三角形作为主三角形，其中至少有一颗星尽量靠近视场中心，以减小畸变对观测三角形特征值的影响。

本文所设计的星敏感器采用大相对口径、长焦距的高精度光学系统，各视场的质心漂移量均要求达到微米量级甚至更高。设计采用双高斯型光学结构向远摄型光学结构过渡的方式，通过对前半部的系统进行复杂化，将光阑前移至第一片透镜上。由于光学系统的焦距长，导致二级光谱较大，为了尽可能地降低二级光谱像差，设计时采用了色散特殊的光学玻璃，以取得较好的效果。系统的相对畸变不超过 0.08%，且所有视场的质心漂移量范围为 $-0.4\sim+0.7\ \mu m$，小于 1/20 个 CCD 像元，畸变较小。

星敏感器在试验前需完成主点、焦距及光学畸变等参数的标定。标定光学畸变拟合系数矩阵后，可以对提取的观测星目标点位置进行修正。

观测星角距 l_{ij} 的计算公式为：

$$l_{ij}=\arccos(\boldsymbol{W}_i\cdot\boldsymbol{W}_j/(\|\boldsymbol{W}_i\|\times\|\boldsymbol{W}_j\|)),\tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{W}_i$、$\boldsymbol{W}_j$ 分别为观测矢量，具体计算公式如下：

$$\begin{cases}\boldsymbol{W}_i=[-x_i\quad -y_i\quad f]^{\mathrm{T}}/\sqrt{x_i^2+y_i^2+f^2}\\ \boldsymbol{W}_j=[-x_j\quad -y_j\quad f]^{\mathrm{T}}/\sqrt{x_j^2+y_j^2+f^2}\end{cases},\tag{8}$$

式中：(x_i,y_i)和(x_j,y_j)分别为星点 i、j 在星敏感器靶面上的坐标；f 为星敏感器焦距。

3.2　星图匹配

主三角形确定后，根据表 1 确定观测三角形，并按式(6)定位子块编号，然后在该子块中，根据下式进行匹配：

$$\begin{cases}|d_{ij}-l_{ij}|\leqslant\varepsilon_d\\ |d_{ik}-l_{ik}|\leqslant\varepsilon_d\end{cases},\tag{9}$$

式中 ε_d 为星角距误差匹配门限。

满足以上条件时，则可根据图 6 确定相应星点的星表号集合，即星点 i、j、m 的星表号分别为 I、J 和 M。

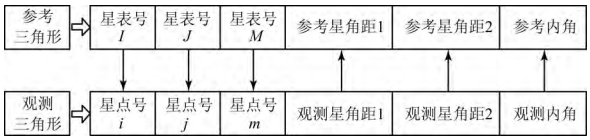


图 6　星图匹配示意图

Fig. 6　Diagram of triangle identification algorithm

若识别结果唯一，则主三角形识别成功，否则引入第四颗星与主三角形中任意两颗星构建另一个三角形进行识别，以进一步排除冗余匹配结果。主三角形识别成功后，可以利用已识别星的先验信息，采用投影匹配映射的方法进行解算，即利用已识别三颗星解算星敏感器姿态矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和视轴指向(α_0,δ_0)。根据 $\boldsymbol{W}=\boldsymbol{AV}$，由观测星的观测矢量计算其赤经、赤纬，然后在按赤纬升序排列的导航星表中查找匹配，查找范围由视轴指向(α_0,δ_0)公式(10)确定，因此大大提高了搜索速度。

$$\begin{cases}\alpha_i\in(\alpha_0-R/\cos\delta_0,\alpha_0+R/\cos\delta_0)\\ \delta_i\in(\delta_0-R,\delta_0+R)\end{cases}.\tag{10}$$

4　试验结果分析

为验证星图识别算法性能，编制了相应的程序包，包括导航星库制定方法、三角形星图识别算法等。试验设备：星敏感器、时统终端及 GPS、串口通信卡、NVIDIA GeForce GTX980，CPU Intel i3 处理器（主频 3.40 GHz）及内存 4 GB 的工控机。软件开发工具为：Windows 7 操作系统，Matlab 2011a，Visual Studio 2012。

试验所用的星敏感器参数如表 2 所示。

表 2　星敏感器参数

Tab. 2　Parameters of star sensor

参数	数值
视场 FOV/(°)	8×8
图像传感器像元数/pixel	1 024×1 024
像元尺寸 D/mm	0.014
焦距 f/mm	94.948 9
极限探测星等/Mv	6.5

选用某天文台的基本星表，经双星处理及剔除高于 6.5 Mv 的恒星后，星表尺寸为 7 653 个，容量为 265 kB。在此基础上，构建了两个三角形最大内角特征库以进行对比。仿真及试验时，在生成的两个特征库中，分块总数 N 分别取为 512 和 1 024 进行对比。

4.1　星点位置噪声对识别率的影响

星敏感器姿态确定算法的基本公式为：

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{V}, \tag{11}$$

式中 $\boldsymbol{A}$ 为星敏感器姿态矩阵表示为：

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{R}_z(\gamma_0)\boldsymbol{R}_x(\pi/2-\delta_0)\boldsymbol{R}_z(\alpha_0+\pi/2), \tag{12}$$

其中：α_0、δ_0、γ_0 分别为星敏感器偏航角、俯仰角及滚动角；$\boldsymbol{R}_x(\delta)$、$\boldsymbol{R}_z(\delta)$ 分别表示 Y-Z 平面绕 X 轴、X-Y 平面绕 Z 轴逆时针旋转 δ 角后所形成的单位转换矩阵。

仿真时，假设 γ_0 取 0°，α_0、δ_0 取值范围分别为 0°～360°和－90°～90°，由蒙特卡洛方法随机产生指向，假设星敏感器视轴过图像传感器靶面中心，则落入星敏感器视场中的恒星可根据式(10)从导航星表中筛选[12]。

考虑星敏感器处于天球两极的情况，若赤经 α_i 左边界小于 0°，则 $\alpha_i=\alpha_i+360°$；若赤经右边界 α_i 大于 360°，则 $\alpha_i=\alpha_i-360°$。根据式(10)确定的视场范围为(α_i，δ_i)，从导航星表中提取观测星，计算观测星在 CCD 靶面上的成像坐标 x_i，y_i：

$$\begin{cases} x_i=\dfrac{f(A_{11}\cos\alpha_i\cos\delta_i+A_{12}\sin\alpha_i\cos\delta_i+A_{13}\sin\delta_i)}{(A_{31}\cos\alpha_i\cos\delta_i+A_{32}\sin\alpha_i\cos\delta_i+A_{33}\sin\delta_i)} \\ y_i=\dfrac{f(A_{21}\cos\alpha_i\cos\delta_i+A_{22}\sin\alpha_i\cos\delta_i+A_{23}\sin\delta_i)}{(A_{31}\cos\alpha_i\cos\delta_i+A_{32}\sin\alpha_i\cos\delta_i+A_{33}\sin\delta_i)} \end{cases}, \tag{13}$$

式中：A_{11}～A_{33} 为姿态矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的对应元素值。

根据焦距 f、视场半径 R，由式(14)计算 CCD 靶面尺寸大小 L：

$$L=f\times 2\times\tan(R). \tag{14}$$

计算 x_i，y_i 是否都在(－L/2～L/2)范围内，从而判断第 i 颗观测星是否在 CCD 靶面上成像。若在靶面内成像，则将观测星的靶面坐标转换为像素坐标，将视星等转换为对应的灰度值，由此生成 3 600 帧星图数据。

然后设定不同的星点位置误差，根据所生成的星图靶面数据进行星图识别，并与相应的星点赤经、赤纬等数据进行比对，数据一致则判断该帧星图识别成功，最后统计 3 600 帧星图在设定的星点位置误差下的所有恒星的识别率，求平均值。当标准差为 σ 像元时，不同定位误差下的识别结果如图 7 所示。

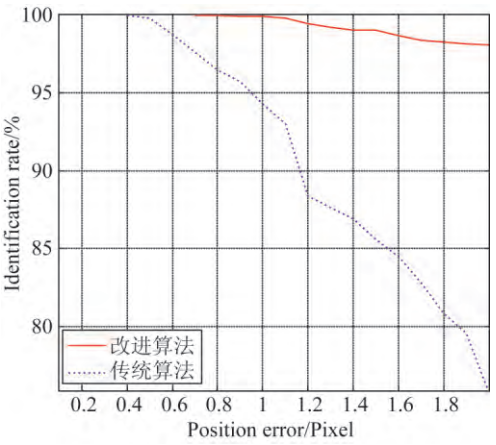


图 7　星点位置噪声对识别率的影响

Fig. 7　Effect of position noise on identification rate

由图可知，星点位置噪声低于 2 pixel 时，本

文方法的识别率优于 98.08%，而传统三角形识别算法的识别率仅为 75.36%，前者识别率明显高于后者。与其它三角形算法相比，基于最大内角的三角形识别算法识别率也相对占优或与其相当。这是因为三角形最大内角分布范围宽、区分度优，且采用了基于散列函数的匹配算法，因而具有识别速度快、识别率高等优点。金字塔算法在星图中包含 4 颗以上导航星时，能给出正确结果的概率接近 100%[2]，针对但该算法在小角距时矢量内积区分度欠佳的不足[11]，李辉提出了基于矢量外积的改进金字塔算法，其识别成功率可达 96.7%[11]；而基于主星对的三角形识别算法在位置误差为 2 pixel 时，识别率高于 97.38%[5]。

4.2　识别速度

识别速度与分块总数 N 与星点总数有关。从以上生成的 3 600 幅星图数据中，以观测星数目相同的星图统计星图识别时间平均值；同时，还采用具有不同分块总数的导航特征库及视场限制范围进行交叉实验，统计识别时间，如图 8 所示。

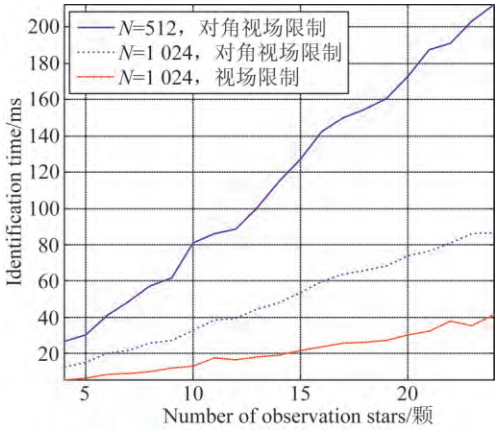


图 8　子块总数与观测星数对识别时间的影响

Fig. 8　Effect of number of observation stars and block number on identification time

由图 8 可知：

(1)当主三角形选择合适时(尽量靠近视场中心)，两个特征库均实现了星图的准确识别，其中当观测星数为 10 颗，分块总数为 1 024 时，基于对角视场限制和视场限制两个特征库的识别时间分别为 32.8 ms 和 13.1 ms。

(2)识别时间随观测星数的增加而增加，当观测星数等于 10 颗，采用分块总数分别为 512 和 1 024 的相同特征库分别进行识别，平均识别时间分别为 80.8 ms 和 32.8 ms。

(3)分块总数越多，识别速度越快，但识别率会有所下降，如 $N=1\ 024$ 的识别速度明显优于 $N=512$，但当星点位置噪声为 1 pixel 时，识别率降为 97.6%。

4.3　星等噪声对识别性能的影响

图 9 为星敏感器的外场试验图。为验证星等噪声对识别性能的影响，2013 年 11 月 21 日在某码头进行了拍星试验，图 10 是某帧星图经降噪及二值化后的处理结果，星图提取结果如表 3 所示。

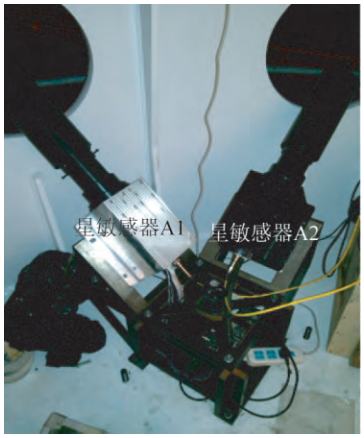


图 9　船载星敏感器外场试验图

Fig. 9　Experiment of shipboard star senor



图 10　降噪及二值化后的星图

Fig. 10　Star image after noise reduction and binary processing

表 3　星图提取与识别结果

Tab. 3　Results of star extraction and identification

星点号	X_i/pixel	Y_i/pixel	灰度值	识别星等/Mv
1	445.961 731	675.956 726	527	5.21
2	657.857 117	795.864 807	306	3.75
3	719.958 923	215.198 624	180	4.85
4	320.885 956	506.280 701	138	5.43
5	451.984 863	115.015 152	133	5.56
6	431.544 128	329.058 838	102	5.00
7	982.772 705	994. 013 411	86	5.35
8	1 002.166 687	421. 002 074	84	5.60
9	708.928 589	168. 001 085	82	5.70
10	811.466 675	413. 003 570	77	6.01

由表 3 可知，由于气象或图像传感器的光谱因素影响，星点 2、3、6、7 的实测灰度值与其星等亮度不成比例，如星点 2 比星点 1 暗很多，但星点 2 视星等却比星点 1 低。对于这些特殊情况，本文算法均能正确识别，而采用传统三角形识别算法进行识别时，星点 6、7 未能识别。将提取数据按识别后的星等按升序或降序重新排列后，所有星点均能正确识别，这是因为算法中没有利用星等信息作为识别特征，因此星图中的星等误差不会对算法造成影响，算法鲁棒性提高。采用改进的金字塔算法[11]也能全部正确识别，因其采用的是观测矢量外积而非星等作为识别特征，而三角形匹配后需要第四颗星验证匹配唯一性，从而降低了识别速度。

将拍摄的近 450 帧有效星图进行数据处理，识别时本文算法采用视场限制特征库、分块总数设为 1 024，与基于星角距的三角形识别算法及文献[11]提出的改进金字塔算法进行对比，结果如表 4 所示。由表 4 可以看出，本文算法识别率达到 98.23%，平均识别时间为 13.96 ms，与仿真图像处理结果基本相符。而改进的金字塔算法识别失败情况多于本文算法，识别失败主要因为视场内恒星少于 4 颗，无法得到唯一匹配。

表 4　识别算法对比

Tab. 4　Performance comparison of three star recognition algorithms

算法	识别星图数	未识别星图数	识别率/%	平均识别时间/ms
基于星角距的三角形算法	416	37	91.83	31.67
改进的金字塔算法[11]	437	16	96.46	24.83
本文算法	445	8	98.23	13.96

5　结　论

本文针对传统三角形识别算法的不足，提出了一种基于最大内角散列函数的三角形识别算法。该算法通过构建三角形最大内角及其两边的导航特征库，对生成的特征库按最大内角的大小构造散列函数，并分块升序存储。识别时采用哈希查找法实现了子块的快速定位，每个观测三角形的识别均在该子块内进行，从而提高了识别速度。仿真及试验结果表明：星点位置噪声低于 2 pixel 时，识别率优于 98.08%；观测星数等于 10 颗，分块总数为 1 024 时，平均识别时间分别为 13.1 ms，识别率优于 97.6%。由于该特征库中不含星等特征信息，因而抗星等噪声能力强。

本文所述方法已在某型船用星敏感器上得到了成功应用，由于其不受空间限制且便于初期的算法验证和试验调试，采用高性能工业控制计算机配备 GPU 显卡 NVIDIA GeForce GTX980 来计算，采用 GPU 并行计算架构，将耗时的图像处理包含了图像滤波、阈值分割及连通域检测等交给 GPU，而且离线导航特征库生成也采用 GPU 并行算法实现。软件正常工作时，CPU 占有率低于 10%。目前试验性的嵌入式硬件平台已经完成初步搭建，下一步待算法固化后，将进行程序算法移植，进而实现系统轻量化、小型化，以便用于星载或弹载等领域。

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] MORTARI D, JUNKINS J L, SAMAAN 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.

[3] **樊巧云，陆壮志，魏新国，等. 基于惯性比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)

[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] **王海涌，费峥红. 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. An improved star pattern identification algorithm based on main star [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 220-224. (in Chinese)

[6] **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)

[7] DOMENICO A, GIANCARLO U. Brightness-independent start-up routine for star trackers [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(3), 813-821.

[8] **陆敬辉，王宏力，孙渊，等. 三角形内切圆的星图识别算法[J]. 红外与激光工程**，2011,40(4):752-756.
LU J H, WANG H L, SUN Y, *et al*.. Star pattern identification algorithm by triangle incircle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4):752-756. (in Chinese)

[9] **文涛，王宏力，陆敬辉. 基于星三角形外接圆的星图识别算法[J]. 传感器与微系统**，2012，31(2): 74-80.
WEN T, WANG H L, LU J H, *et al*.. Star pattern identification algorithm based on star triangle circumcircle [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(2):74-80. (in Chinese)

[10] **郑胜，吴伟仁，田金文，等. 一种基于三角形几何结构的星图识别算法[J]. 光学技术**，2004,30(1): 70-73,77.
ZHENG SH, WU W R, TIAN J W, *et al*.. A novel geometric structure-based autonomous star pattern identification algorithm [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(1):70-73,77. (in Chinese)

[11] **李辉，王安国，张磊. 改进金字塔算法用于小视场星图识别[J]. 应用光学**，2013，34(2):267-272.
LI H, WANG A G, ZHANG L. Modified pyramid algorithm for small FOV star image recognition [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(2): 267-272. (in Chinese)

[12] **郭敬明. 基于星敏感器的船姿测量方法研究[D]. 北京：中国科学院大学**，2013.
GUO J M. *Study on ship attitude measurement based on star sensor* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

作者简介：



张同双(1968－)，**男，江苏泗阳人，高级工程师，1993 年获重庆大学获得学士学位，2006 年于中国科学技术大学获得硕士学位，主要研究方向为船姿船位测量技术。**



郭敬明(1985－)，**男，湖北荆州人，博士，助理研究员，主要从事光电设备测量、星敏感器船体姿态测量方面的研究。**E-mail:gjm441@163.com