

文章编号 1004-924X(2009)01-0220-05

改进的基于主星的星图识别算法

王海涌, 费峥红, 张 超
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘要: 为了建立更高效的星图识别算法, 设计了一种以主星与邻星角距为识别特征的星图识别算法。构建了导航星库, 将所有邻星与主星角距进行量化编码, 并按照从小到大的顺序排列为特征模式字符串, 串尾附加字符串长度项为聚簇索引, 借以提高导航星库的检索速度; 然后, 利用改进的 KMP 字符串识别方法对观测星进行匹配识别。当存在 2 pixels 的高斯位置噪声时, 该算法成功识别率高于 97.38%, 导航星库的存储容量为 149.4 kB。在 Pentium 1.6 GHz PC 机上随机识别 1 250 幅星图, 平均识别时间为 42.78 ms。此识别算法对观测图像具有旋转不变性, 对位置和星等噪声都有很好的鲁棒性, 且导航星库的存储容量小、检索效率高、实时性好。

关 键 词: 星敏感器; 星图识别; 字符串匹配; 导航星库

中图分类号: V448.222; TP391.41 文献标识码: A

An improved star pattern identification algorithm based on main star

WANG Hai-yong, FEI Zheng-hong, ZHANG Chao
(*School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China*)

Abstract: To establish a more effective string pattern matching algorithm, a new improved star identification algorithm taking angular distances between main star and neighbor stars as recognition characteristics is designed. A guide star catalogue is constructed, and the angular distance values between main star and neighbor stars are encoded to quantized codes; then each code in characteristic character strings is rearranged from small to large in sequence. A string length code is appended to the end of the string to improve search speed of guide star catalogue, and so far the main star's neighbor pattern is finished. Finally, an improved string matching algorithm based on KMP is proposed to identify the corresponding matches to the measured star in the whole guide star patterns. The identification rate of this algorithm is greater than 97.38% when the Gauss noise of position error is 2 pixels. 1 250 star maps are identified randomly on Pentium 1.6 GHz PC, and the average identification time is 42.78 ms. This algorithm has rotation invariability, good robustness and synchronization. The catalogue storage content is only 149.4 kB, so it can offer a higher retrieval efficiency.

Key words: star sensor; star identification; string match; guide star catalogue

1 引言

星敏感器作为航天器自主导航设备的重要组成部分, 为航天器提供了精确的姿态信息和无姿态积累误差。自主星图识别作为其核心, 不但要实现姿态的快速准确获取, 而且当由于某种原因造成姿态丢失或者迷航时还能实现快速重建。因此, 识别速度和识别成功率是衡量识别算法性能好坏的关键指标^[1]。

目前较流行的识别算法有三角形匹配算法^[2], 多边形角距匹配算法和 Bezooijen 提出的主星识别法等。三角形算法星库容量大, 算法复杂, 运算慢, 但在同等位置噪声的情况下的识别率明显高于字符串算法; 而基于主星的字符串算法或栅格算法具有星库小、匹配速度快的显著优势, 对星等误差有更强的适应能力, 但位置误差加大时, 匹配成功率下降, 鲁棒性稍差。实际情况是, 存在较大星等误差的可能性要高于较大位置误差的可能性, 所以主星识别算法应该能更好地适应实际情况, 两方法组合可以优势互补。首幅图的捕获优先强调匹配成功率, 识别时间居于次要地位, 可以考虑采用三角形匹配算法, 捕获后进入跟踪模式阶段, 采用主星识别法, 实时性好。至于四边形匹配算法, 实质上是对三角形算法的改进, 当星等精度为 $0.5 M_v(3\sigma)$, 位置精度为 $10''(1\sigma)$ 时, 算法的识别成功率可以提升到 99.2% (2 000 次 Monte Carlo 采样样本)^[3]。这里需要郑重说明, 各种仿真算法得到的成功率甚至高达接近 100%, 实际某上天的最新星敏型号的匹配成功率, 据调研只是保持在 90%, 仿真算法匹配成功率和型号上的匹配成功率, 差距很大, 根本原因是计算机仿真环境、半物理仿真环境和太空真实环境的较大差异。

尽管各种文献提出了许多新理论和新方法, 但真正能够应用于工程实际的并不多, 比较可靠的星图识别算法仍然是三角形算法和主星识别法, 比如字符串算法。本文阐述的就是一种以伴星相对于主星角距为识别特征的字符串匹配星图识别算法的实现。

2 星图识别原理

星敏感器在进行星图识别时, 利用 CCD (或

CMOS APS) 图像传感器拍摄当前视场内的星空图像, 图像经过预处理, 提取星体在观测视场内的位置和亮度信息, 并由星图识别算法在导航星库中找到观测星的对应匹配, 最后利用这些匹配星的已知方位信息计算出星敏感器的三轴姿态^[4]。本文基于文献[5], 提出了基于主星与邻星角距的字符串匹配识别算法。其原理流程如图 1 所示:

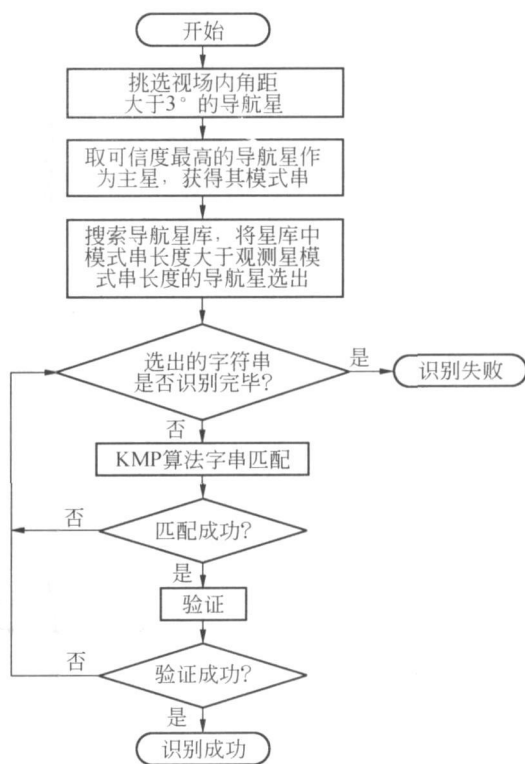


图 1 星图识别原理的流程图

Fig. 1 Flow chart of star map identification

3 星图识别算法

基于主星与邻星角距的识别算法, 也是星图匹配法的一种实现方式, 特征模式是将角距量化编码后得到的字符串。其实现步骤如下:

3.1 导航星库制作

3.1.1 导航星的选取

当导航星的数目不够多且选择不合适时, 可能导致“空拍”, 即在某个天区视域内星敏感器拍摄到的恒星数目小于 6 颗或均不是导航星, 这可能导致匹配失败或者误匹配; 当所选导航星数目过多时, 又会增加导航星库的容量, 并延长识别时间, 同时会导致冗余匹配。因此, 本文选取恒星角

距 $>3^{\circ}$, 星等 ≤ 6 Mv 的恒星作为导航星。

3.1.2 导航星库的制作

采用星敏感器视场 FOV 为 $16^{\circ}\times 16^{\circ}$, SAO^[6] 星表制定导航星库, SAO 星表含有 258 997 颗恒星, 仅留星号、赤经、赤纬和星等, 亮度 >6 Mv 的恒星, 共 5 906 颗。为了避免重复匹配, 这些恒星中只保留角距 $>3^{\circ}$ 的作为导航星, 当有 2 个导航星角距 $<3^{\circ}$, 保留较亮的那颗, 这样数量进一步减少为 3 283 颗, 用以构建导航星库。以导航星库中的每颗导航星(主星)方位矢量为视轴方向, 扫描导航星表, 将视场内的导航星(邻域内伴星)投影到 CCD 成像平面上, 得到邻域伴星投影到 CCD 平面上的位置 (x_i, y_i) 表达式为^[7]

$$x_i = \frac{N_x}{2} \times \frac{1}{\tan(\text{FOV}_x/2)} \times \frac{\sin \hat{q} \cos \hat{\theta} - \cos \hat{q} \sin \hat{\theta} \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \alpha_i \sin \hat{\theta} + \cos \hat{q} \cos \hat{\theta} \cos(\alpha_i - \alpha_0)}, \quad (1)$$

$$y_i = \frac{N_y}{2} \times \frac{1}{\tan(\text{FOV}_y/2)} \times \frac{-\cos \hat{q} \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \alpha_i \sin \hat{\theta} + \cos \hat{q} \cos \hat{\theta} \cos(\alpha_i - \alpha_0)}, \quad (2)$$

其中, N_x, N_y 为 CCD 平面上每行、每列像素的个数, $\text{FOV}_x, \text{FOV}_y$ 为 x, y 方向上的视场角。光轴指向 (α_0, β_0) 即主星方向, (α_i, β_i) 为视场内任一颗邻域伴星的赤经、赤纬。在 $\text{FOV}_x, \text{FOV}_y$ 为 16° , 星等 >6 Mv 作为导航星的情况下, 生成了如图 2 所示的一幅模拟星图, 光轴指向赤经赤纬 $(15^{\circ}38'45'', 25^{\circ}4'36'')$, 星像散焦为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 。

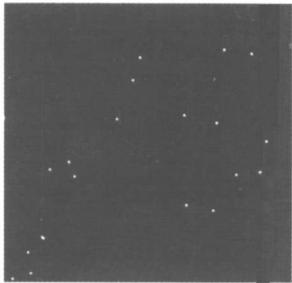


图 2 一幅投影模拟星图

Fig. 2 Projective star map generated by star simulator

定义角距 θ 为主星投影点和镜头中心与每一个邻域伴星和镜头中心的夹角, 定义最大角距 θ_{\max} 为 CCD 两轴 x 轴或 y 轴的最边缘点与主星的夹角, θ_{\max} 如图 3 所示。

S_1, S_2 为邻域内伴星, 它们与主星所成的角

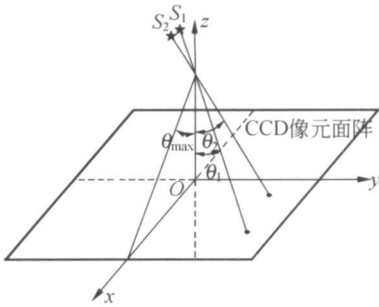


图 3 主星成像在 CCD 的中心 O

Fig. 3 Main star image centering on CCD

距分别为 θ_1, θ_2 。将 θ_{\max} 分成 99 等份, 每份角距为 $\theta_{\max}/99$, 将 θ 表示为 $n^0 = \theta/(\theta_{\max}/99)$, 将 n^0 四舍五入后取整得到这颗邻域伴星的模式字符, 将所有的邻域伴星都做同样的编码, 并将所有模式字符从小到大排序, 得到最终要匹配的模式字符串 $n^0 n^1 n^2 \dots n^m$, 并将其存储在导航星库中。如星号为 6 897 的导航星其模式串为: 3 143 435 375 787 979 838 491 919 394, 其中“31”、“43”...表示邻域伴星相对于主星 6 897 的角距的相对坐标, “31”这颗伴星的实际角距为 $(\theta_{\max}/99) \times 31$ 。

得到匹配串后, 为了提高匹配的速度, 增加了匹配串的长度项, 记录每个导航星的模式字符串长度; 识别时仅仅识别不小于观测星模式串长度的导航星模式串, 可以减少观测星与导航星的匹配次数, 从而提高识别速度。另设置字符串长度项为聚簇索引, 可以提高检索导航星库的速度, 从而提高了识别速度。

经过以上步骤后, 得到的导航星库的数据结构如图 4 所示。

星号	赤经	赤纬	视星等	匹配串	串长
63648	3.5668450300000001	0.63346506999999996	4.9000000000000004	213643556369727380	18
63783	3.6293735599999999	0.60116568999999995	5.0	24414352683858788	18
64053	3.7437161000000002	0.61975790000000004	4.7999999999999998	4196973364868993	18
64202	3.8040752000000002	0.53008175000000002	3.8000000000000003	46536473869598899	18
64203	3.8051580399999999	0.66860509000000001	3.0	30394749767786898	18
60890	2.2380193400000001	0.64351139999999997	6.0	206063688182838799	18
60907	2.2452362999999999	0.63564072000000005	5.7999999999999998	20497171838889192	18
83084	3.6502237000000002	0.47982698000000001	5.2000000000000002	354951657276798799	18
83394	3.80628937	0.46560441000000001	5.9000000000000004	3546545616485894	18
82993	3.6072547199999999	0.44898734	5.9000000000000004	3035435660656787393	20
82835	3.51296214	0.41633753000000001	5.7999999999999998	3548564656477700699	20
82651	3.4312128799999999	0.39472434000000001	5.9000000000000004	41856467687481908094	20
81298	2.7051400600000002	0.34630207000000002	2.6000000000000001	45535669767879798999	20
81692	2.9182669000000001	0.43037176999999999	5.6000000000000005	2637535874758599897	20
81893	3.03817746	0.48487021000000002	5.7999999999999998	51878081818385919585	20

图 4 导航星库中导航星的数据结构

Fig. 4 Data structure of guide star catalogue

3.2 星图识别

基于上述导航星库的制作过程, 建立观测星图中主星的选取原则。邻域伴星的个数 n_{neighbor} 越多, 观测星被正确识别的概率越高。同时亮度较高的星更容易被捕捉到, 具有更高的可信度。每

颗观测星的可信度^[3] $Q = M/n_{\text{neighbor}}$, M 为星等。将观测星按照 Q 取值排序, 具有最小 Q 值的星作为主星, 优先对其进行匹配。

将选出来的主星, 根据星图解算得到的角距数据进行字符串编码, 编码的方式和导航星库中导航星编码方式相同。从而得到观测星图中的匹配字符串 $s^0 s^1 s^2 \cdots s^q$ 。

在进行匹配时, 由于经典的 KMP 字符串匹配算法属于精确匹配, 无法直接应用于星图识别, 因此需要进行改进, 本文应用的方法其原理如图 5 所示。

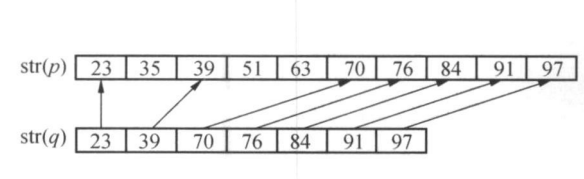


图 5 字符匹配的原理图
Fig. 5 Principle of string matching

观测星的模式字符串:

$$\text{Str}(q) = s^0 s^1 s^2 \cdots s^q,$$

导航星的模式字符串:

$$\text{Str}(p) = n^0 n^1 n^2 \cdots n^p,$$

字符匹配的定义:

$$|s^i - n^i| \leq 1,$$

式中, p, q 为导航星和观测星的个数, 也表示模式串长度, i 为两模式串中对应恒星的序号, 按照序号依次比较, 两字符对应的恒星与主星的角距偏差不大于 $\theta_{\text{max}}/99$, 作为匹配判据。

如果 $\text{Str}(q)$ 中的所有字符在 $\text{Str}(p)$ 中都可以依次找到匹配字符, 即观测星的邻域伴星都能匹配成功, 进入验证环节; 若能通过验证, 则此模式串对应的导航星即为要识别的主星; 否则匹配导航星库中下一颗导航星。

如果 $\text{Str}(q)$ 中存在与 $\text{Str}(p)$ 中无法匹配的字符, 即观测星图中出现邻域伴星无法匹配, 则继续匹配下一颗邻域伴星, 如果仍然无法匹配, 才认为匹配失败, 建立这样的步骤有助于在行星变星等进入视场的情形下提高星图匹配的鲁棒性。如果导航星库中的所有导航星的模式字符串都无法

参考文献:

[1] 房建成, 全伟, 孟小红. 基于 Delaunay 三角剖分的全天自主星图识别算法[J]. 北京航空航天大学学

和观测星图中主星的模式字符串匹配, 则识别失败。

恒星在 CCD 成像、质心提取等环节都有噪声的影响, 即使存在 2 pixel 的高斯位置噪声时, 成功识别率仍在 97.38% 以上, 如图 6 所示为位置标准偏差对识别率的影响, 图中加入了 1 M_v 星等的噪声。

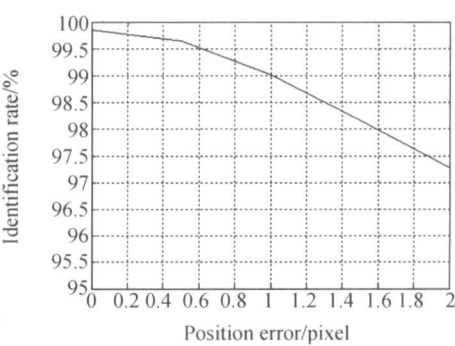


图 6 位置偏差对识别率的影响
Fig. 6 Influence of position error on identification rate

4 结 论

导航星库中每颗导航星周围的邻域伴星平均为 17.3 颗, 每颗邻域伴星占用 2 Bytes, 星号都是整型的占 2 Bytes, 赤经、赤纬为浮点型占用 4 Bytes, 串长占 2 Bytes, 所以整个的导航星库所占的容量为 $3\,283 \times (17.3 \times 2 + 2 + 4 + 4 + 2) = 149.4 \text{ kB}$, 而三角形匹配算法星库约 2.42 MB^[2], 栅格算法星库约 0.7 MB^[8]。

该算法在 Pentium 1.6 GHz PC 机上运行, 随机识别 1 250 幅星图, 平均识别时间为 42.78 ms。平均识别速度优于三角形匹配算法 (200 ms)^[3] 和栅格算法 (800 ms)^[8]。

此识别算法对位置和星等噪声的鲁棒性都比较好, 识别速度快。导航星库所占内存空间少, 便于工程实现。该算法的限定条件为要求视场内要有一定数量的导航星 (6 颗以上), 即要求星敏感器的视场较大, 大视场目前正是 CMOS APS 星敏感器产品的研发趋势。

报, 2005, 31(3): 312-315.

FANG JCH, QUAN W, MENG XH. All-sky autonomous star map identification algorithm based on

- Delaunay triangulation cutting algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(3): 312-315. (in Chinese)
- [2] 李立宏, 林涛, 宁永臣, 等. 一种改进的全自主三角形星图识别算法[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 372-374.
LI L H, LIN T, NING Y CH, *et al.*. Improved all-sky autonomous triangle star-field identification algorithm[J]. *Optics Technique*, 2000, 26(4): 372-374. (in Chinese)
- [3] 林涛, 周建林, 张钧萍, 等. 四边形全自主星图识别算法[J]. 宇航学报, 2000, 21(2): 82-85.
LIN T, ZHOU J L, ZHANG J P, *et al.*. All-sky automated quaternary star pattern recognition[J]. *Journal of Astronautics*, 2000, 21(2): 82-85. (in Chinese)
- [4] 阚道宏. 空间飞行器姿态确定用的 CCD 星敏感器[D]. 北京: 北京控制工程研究所, 1992.
KAN D H. *CCD star sensor used for attitude determination in spacecrafts*[D]. Beijing: Beijing Institute of Control Engineering, 1992. (in Chinese)
- [5] 魏新国, 张广军, 江洁. 基于 Log-Polar 变换的星图识别算法[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 678-681.
WEI X G, ZHANG G J, JIANG J. A star identification algorithm based on Log-Polar transform[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 687-681. (in Chinese)
- [6] ROMAN N G, H WARREN W. Smithsonian astrophysical observatory star catalog (SAO) documentation[Z]. *The Machine-Readable Version (Version 1990)*. *NSSDC/WDC-A-R &S* 89-08.
- [7] 房建成, 宁晓琳, 田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
FANG J CH, NING X L, TIAN Y L. *Principle and Method of Autonomous Celestial Navigation of Spacecraft*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 李立宏, 徐洪泽, 张福恩. 一种改进全自主栅格星图识别算法[J]. 光学技术, 2000, 26(3): 204-210.
LI L H, XU H Z, ZHANG F E. A kind of improved grid algorithm for all-sky autonomous star field identification[J]. *Optical Technique*, 2000, 26(3): 204-210. (in Chinese)

作者简介:



王海涌(1969—), 男, 河北唐山人, 博士, 讲师, 主要从事 CCD 精密测量、天文导航及组合导航技术的研究; E-mail: why@buaa.edu.cn



费峥红(1983—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事星敏感器和天文导航技术的研究; E-mail: feizhenghong@163.com

张超(1985—), 男, 河北张家口人, 学士, 主要从事星敏感器方面的研究。E-mail: shijiazhuang7@sina.com